



TITLE:

全世界を対象とした人為起源の物質・エネルギーフロー勘定表の構築手法とその適用( Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

藤森, 真一郎

---

CITATION:

藤森, 真一郎. 全世界を対象とした人為起源の物質・エネルギーフロー勘定表の構築手法とその適用. 京都大学, 2009, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2009-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k14559>

RIGHT:

全世界を対象とした人為起源の  
物質・エネルギーフロー勘定表の  
構築手法とその適用

藤森 真一郎



## 目次

図一覧	.....	ii
表一覧	.....	v
第 1 章	序論.....	1
第 2 章	既往の研究と本研究の特徴 .....	10
第 3 章	研究の全体像と手法の概要 .....	24
第 4 章	貿易マトリクスの構築.....	30
第 5 章	貨幣勘定の構築とそれを用いたエネルギー消費量、二 酸化炭素排出量の推計.....	53
第 6 章	エネルギー産出投入表の構築 .....	93
第 7 章	全世界炭素・窒素・リン物質勘定表の構築 .....	123
第 8 章	全世界の鉄物質勘定表の構築 .....	174
第 9 章	過去 30 年における世界全域の物質フロー .....	199
第 10 章	結論.....	238
謝辞	.....	241



## 図一覧

図 1.1 世界全体の粗鋼生産量の変遷 .....	1
図 1.2 世界全体のセメント生産量の変遷 .....	1
図 1.3 1983 年における全世界の貿易フロー図(森口ら, 2007) .....	3
図 1.4 2003 年における全世界の貿易フロー図(森口ら, 2007) .....	4
図 1.5 ドイツの粗鋼生産量 .....	5
図 1.6 インドの粗鋼生産量 .....	5
図 1.7 インドの製造業における生産額と付加価値額 .....	6
図 1.8 イタリアの自動車産業生産額 .....	7
図 2.1 Malembaum(1978)が示した Intensity of Use 曲線 .....	11
図 3.1 推計の全体像 .....	24
図 3.2 典型的な推計方法と手順 .....	27
図 4.1 推計手法の概要図 .....	34
図 4.2 本研究推計値と各統計、データの貿易総額の比較 .....	42
図 4.3 輸入額の比較(a) .....	43
図 4.4 輸入額の比較(b) .....	44
図 4.5 輸出額の比較(a) .....	44
図 4.6 輸出額の比較(b) .....	45
図 4.7 SITC1 桁における財別の修正量中央値比較 .....	49
図 5.1 推計手法概要図 .....	58
図 5.2 石炭の生産量推移 .....	70
図 5.3 原油の生産量推移 .....	70
図 5.4 天然ガスの生産量推移 .....	71
図 5.5 各国の国内エネルギー消費量の IEA との比較 .....	72
図 5.6 オマーンの国内エネルギー消費量の比較 .....	73
図 5.7 ブルネイの国内エネルギー消費量の比較 .....	73
図 5.8 カメルーンにおける原油と石油精製品の輸入額 .....	74
図 5.9 カメルーンにおける原油と石油精製品の輸入量 .....	74
図 5.10 コンゴのエネルギー消費量と統計不突合の割合 .....	75
図 5.11 IEA Energy Balance(IEA, 2007a; 2007b)の欠測率 .....	75
図 5.12 アルジェリアにおける天然ガスの生産量 .....	77
図 5.13 原油価格の比較 .....	79
図 5.14 天然ガス価格の比較 .....	79
図 5.15 本研究と統計における原油の価格の残渣項のばらつき .....	81
図 5.16 本研究と統計における石炭の価格の残渣項のばらつき .....	81
図 6.1 $\bar{\omega}$ が 1、0.1、0.01 の時の $(d_{13}/d_{12})$ の分布 .....	103
図 6.2 統計値(IEA)の最終エネルギー消費量に対する推計値の国別統計量 .....	105
図 6.3 石炭発電のエネルギー転換効率(推計値) .....	106

図 6.4 石炭発電のエネルギー転換効率(IEA, 2007a; 2007b).....	106
図 6.5 部門別修正量(基準化された $\log a^I_{j,m}$ ).....	107
図 6.6 石油精製におけるエネルギー転換効率(IEA, 2007a; 2007b).....	108
図 6.7 基準化された $\log a^3_r$ .....	109
図 7.1 フローと U 表、V 表、T 表の関係.....	125
図 7.2 U 表、V 表、T 表間の関係.....	125
図 7.3 研究概要図.....	132
図 7.4 部門収支.....	133
図 7.5 産物収支.....	133
図 7.6 農業廃棄物の処理フロー.....	152
図 7.7 家畜糞尿の処理フロー.....	153
図 7.8 人糞と黒液の処理フロー.....	156
図 7.9 一般・産業廃棄物処理フロー.....	157
図 7.10 世界全体の炭素フロー(TgC/年).....	161
図 7.11 世界全体の窒素フロー(TgN/年).....	162
図 7.12 世界全体のリンフロー(TgP/年).....	162
図 7.13 産出量の誤差.....	167
図 7.14 輸入量の誤差.....	167
図 8.1 推計手法概要図.....	178
図 8.2 鉄のフロー概観図(Tg/年).....	184
図 8.3 貿易構造による地域分類.....	186
図 8.4 長期的蓄積への追加量上位 10 地域.....	188
図 8.5 GDP あたりの長期的蓄積への追加量と、一人あたり GDP の関係.....	189
図 8.6 一人あたりの長期的蓄積への追加量と、一人あたり GDP の関係.....	190
図 8.7 一人あたりの長期的蓄積への追加量と、一人あたりの資本ストック量の関係 .....	191
図 9.1 $\varepsilon d$ と目的関数 $L$ の関係.....	200
図 9.2 価格の標準偏差.....	205
図 9.3 観測値と推計値の平方平均誤差.....	205
図 9.4 観測値と推計値の平方平均誤差率.....	206
図 9.5 炭素の環境投入物の投入量推移(TgC/年).....	207
図 9.6 炭素の環境投入物の内訳の変化.....	207
図 9.7 2000 年における炭素の環境投入物の投入量の上位 10 地域の内訳.....	208
図 9.8 炭素の環境投入物の部門別内訳.....	208
図 9.9 2000 年における炭素の直接物質投入量の上位 10 地域の内訳.....	209
図 9.10 1971 年を 1 とした地域別の炭素の直接物質投入量の推移.....	210
図 9.11 1971 年を 1 とした地域別の GDP あたりの炭素直接物質投入量の推移.....	211
図 9.12 窒素の環境投入物の投入量推移(TgN/年).....	211
図 9.13 窒素の環境投入物の内訳の変化.....	212
図 9.14 2000 年における窒素の環境投入物の投入量の上位 10 地域の内訳.....	213

図 9.15 窒素の環境投入物の投入物別内訳 .....	213
図 9.16 2000 年における窒素の直接物質投入量の上位 10 地域の内訳 .....	214
図 9.17 1971 年を 1 とした地域別の炭素の直接物質投入量の推移 .....	215
図 9.18 1971 年を 1 とした地域別の GDP あたりの窒素直接物質投入量の推移 .....	216
図 9.19 1971 年を 1 とした地域別の第一次産業付加価値あたりの窒素直接物質投入量の推移 .....	217
図 9.20 リンの環境投入物の投入量推移(TgP/年) .....	217
図 9.21 リンの環境投入物の内訳の変化 .....	218
図 9.22 2000 年におけるリンの環境投入物の投入量の上位 10 地域の内訳 .....	219
図 9.23 リンの環境投入物の部門別内訳 .....	219
図 9.24 2000 年におけるリンの直接物質投入量の上位 10 地域の内訳 .....	220
図 9.25 1971 年を 1 とした地域別のリンの直接物質投入量の推移 .....	221
図 9.26 1971 年を 1 とした地域別の GDP あたりのリン直接物質投入量の推移 .....	222
図 9.27 鉄の環境投入物の投入量推移(TgFe/年) .....	223
図 9.28 鉄鋼の生産量推移(TgFe/年) .....	224
図 9.29 1971 年における鉄鋼生産量上位 10 地域の内訳 .....	224
図 9.30 2000 年における鉄鋼生産上位 10 地域の内訳 .....	225
図 9.31 1971 年を 1 とした地域別の鉄の直接物質投入量の推移 .....	226
図 9.32 1971 年を 1 とした地域別の GDP あたりの鉄の直接物質投入量の推移 .....	226
図 9.33 1971 年を 1 とした各種指標の推移(世界全体) .....	227
図 9.34 1971 年を 1 とした各種指標の推移(先進国) .....	228
図 9.35 1971 年を 1 とした各種指標の推移(新興国) .....	229
図 9.36 1971 年を 1 とした各種指標の推移(途上国) .....	229
図 9.37 経済発展と炭素の直接投入強度の関係 .....	230
図 9.38 経済発展と窒素の直接投入強度の関係 .....	231
図 9.39 経済発展とリンの直接投入強度の関係 .....	231
図 9.40 経済発展と鉄の直接投入強度の関係 .....	232
図 9.41 地域別の農地における窒素溶脱量推移 .....	233
図 9.42 地域別の農地における窒素の投入量と産出量 .....	233

## 表一覧

表 2.1 PIOT の枠組みの一例 .....	12
表 2.2 PIOT の事例 .....	14
表 4.1 国際機関発行のバイラテラル貿易統計一覧 .....	31
表 4.2 本研究推計値と統計、他研究の貿易総額の経年変化(bil US\$) .....	41
表 4.3 1978 年、1983 年において WTF と本研究推計値の差が大きかった上位 5 カ国 (mil\$) .....	43
表 4.4 1992 年において COMTRADE で欠測していた国と本研究推計値(bil \$) .....	46
表 4.5 OECD 諸国における国別の COMTRADE からの修正量 .....	47
表 4.6 SITC1 桁の財ごとの COMTRADE からの修正量 .....	48
表 5.1 貨幣勘定表の枠組み .....	54
表 5.2 エネルギー勘定表 .....	55
表 5.3 産業分類、財分類 .....	56
表 5.4 統計一覧 .....	69
表 5.5 国内エネルギー消費量の大きかった国における IEA と本研究推計値の比較 .....	72
表 5.6 2000 年における CO <sub>2</sub> 排出量の比較 .....	76
表 5.7 各推計値の排出係数(CO <sub>2</sub> /toe) .....	77
表 5.8 2000 年の原油の輸入価格の比較 .....	80
表 6.1 エネルギー源一覧 .....	94
表 6.2 部門一覧 .....	95
表 6.3 エネルギー投入産出表の枠組み .....	96
表 6.4 $\bar{\omega}$ が 1、0.1、0.01 の時の国別 ( $d_{13}/d_{12}$ ) の平均値、中央値、標準偏差 .....	103
表 6.5 統計値(IEA)の最終エネルギー消費量に対する推計値の国別統計量 .....	104
表 6.6 IEA(2007a, 2007b)においてエネルギー転換効率が上限を越えている国、年 .....	105
表 7.1 財分類 .....	126
表 7.2 廃棄物分類 .....	127
表 7.3 環境排出物の分類 .....	127
表 7.4 大気排出物環境排出物の分類 .....	128
表 7.5 環境投入物 .....	128
表 7.6 蓄積物の分類 .....	129
表 7.7 生産活動の分類 .....	129
表 7.8 U 表の構造 .....	130
表 7.9 V 表の構造 .....	131
表 7.10 T 表の構造 .....	131
表 7.11 U 表と式中の変数の関係 .....	133
表 7.12 V 表と式中の変数の関係 .....	134
表 7.13 本研究で用いたサフィックスの一覧 .....	134
表 7.14 本研究で設定した元素含有率(%) .....	139

表 7.15 家畜一頭あたりの体重 .....	140
表 7.16 木材の密度 .....	140
表 7.17 木材財の元素含有率 .....	141
表 7.18 家畜の糞尿発生源単位と元素含有率 .....	143
表 7.19 農業廃棄物産出率と元素含有率 .....	144
表 7.20 ガス排出原単位 .....	146
表 7.21 水田の耕作方法の割合(%) .....	147
表 7.22 水田におけるメタン排出原単位(kg-CH <sub>4</sub> /ha/yr) .....	147
表 7.23 家畜の反芻によるメタンの発生原単位(kg-CH <sub>4</sub> /hd/yr) .....	148
表 7.24 化石燃料燃焼によるメタン発生源単位(kg-CH <sub>4</sub> /TJ) .....	149
表 7.25 化石燃料燃焼時の窒素酸化物、亜酸化窒素排出原単位 .....	150
表 7.26 特殊な扱いをした亜酸化窒素の排出原単位 .....	150
表 7.27 各地域、各年における農業廃棄物燃焼割合(%) .....	151
表 7.28 家畜種ごとの糞尿処理過程からのメタン排出原単位(kg-CH <sub>4</sub> /hd/yr) .....	153
表 7.29 気候、糞尿処理別のメタン変換効率 .....	153
表 7.30 牛、豚、水牛に関するパラメータ .....	154
表 7.31 家畜糞尿処理過程からの亜酸化窒素排出割合 .....	154
表 7.32 地域、家畜種別の家畜糞尿の処理方法(%) .....	155
表 7.33 衛生施設の元素除去率 .....	156
表 7.34 各地域の廃棄物埋立率 .....	158
表 7.35 農業過程から発生するガスの変換率 .....	159
表 7.36 炭素 U 表(TgC/年) .....	159
表 7.37 炭素 V 表(TgC/年) .....	159
表 7.38 窒素 U 表(TgN/年) .....	160
表 7.39 窒素 V 表(TgN/年) .....	160
表 7.40 リン U 表(TgP/年) .....	160
表 7.41 リン V 表(TgP/年) .....	161
表 7.42 フローの割合一覧 .....	164
表 7.43 炭素の貿易マトリクス .....	165
表 7.44 窒素の貿易マトリクス .....	166
表 7.45 リンの貿易マトリクス .....	166
表 7.46 本研究と他研究の推計値の比較 .....	168
表 8.1 本研究地域区分 .....	176
表 8.1 産物分類 .....	177
表 8.3 廃棄物、環境排出物の発生係数 .....	182
表 8.4 生産量、投入量における統計値と推計値 .....	183
表 8.5 貿易量における統計値と推計値 .....	183
表 8.6 本研究と日本鉄源協会の推計値の比較 .....	184
表 8.7 スクラップ純輸出量と国内供給量に対する割合 .....	187
表 8.8 スクラップ純輸入量と国内供給量に対する割合 .....	187

表 9.1 地域分割 .....	204
------------------	-----

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 物質フローに関連する問題

産業革命以降、人類社会は大きな変化を遂げた。その変化は多岐にわたるものであるが、その中でも人口増加、経済規模の拡大、社会経済で生産・消費する物質フロー増大等は人々の生活を大きく変えた。そのおかげで現在多くの国、特に OECD をはじめとした先進諸国では物質的に豊かな生活を享受することができるようになった。ここでは、社会経済で生産する物質フローの増大を表すデータを2つ挙げる。図 1.1、図 1.2 は 20 世紀の世界全体における粗鋼とセメントの生産量の変遷を表している。グラフを見るとわかるように、この 100 年程度の間には物質の生産量が大きく増大していることがわかる。

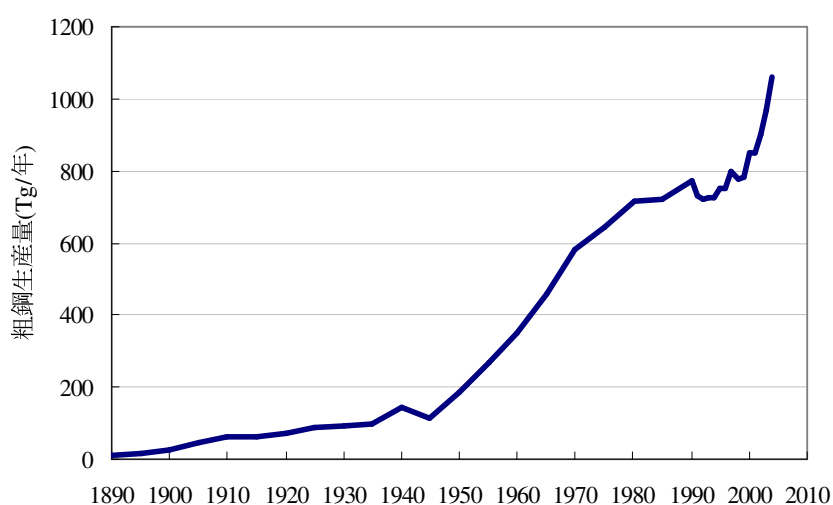


図 1.1 世界全体の粗鋼生産量の変遷  
(Mitchell(2007a, 2007b, 2007c) IISI(2000,2006))より筆者作成

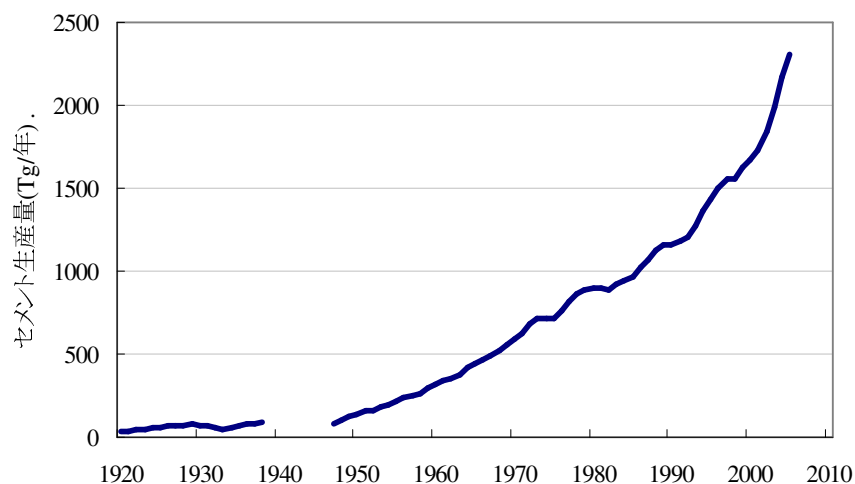


図 1.2 世界全体のセメント生産量の変遷  
(CEMBUREAU, 1996; CEMBUREAU, 2004) (ただし 1939 年-1946 年は欠測)

しかし、そういった物質フローの増加は物質的豊かさという便益のみをもたらしたわけではなく、いくつかの問題の原因ともなった。

その問題の第一に環境問題が挙げられる。物質フローの増加により物質の環境中への排出量が増加した。その結果、大気、水質、土壌、生態系が劣化し、それらは人間自身の健康や経済活動にとっての負荷となった。大気汚染は、主として燃料の燃焼による窒素酸化物、硫黄酸化物、オゾン、PM が原因となった。富栄養化などの水質汚染は人間の排泄物、窒素・リンなどの化学肥料の大量投入が原因となり、木材の大量消費は森林資源の過剰採取を招き、熱帯雨林の減少、生物種の減少を引き起こした。気候変動問題は、化石燃料の燃焼由来の二酸化炭素、農業や工業プロセス由来のメタン、亜酸化窒素が大きく寄与しており (IPCC, 2007a)、気候変動による影響はすでに顕在化しているとされている (IPCC, 2007b)。また、将来これらの環境問題に対してなんらかの対策をとらなければ、問題はより深刻化することも懸念されている (OECD, 2008)。

物質フローの増大に関連する問題の第二に、資源の枯渇問題がある。現在の大量の物質フローを伴う経済システムは、自然環境中から資源を採取することを前提としている。資源を適切な量採取する場合、すなわち資源の埋蔵量、あるいは再生可能量に対して十分小さい量を採取する場合には資源枯渇問題は起こらないが、資源を過剰に採取した場合には資源の枯渇問題が発生する。

### 1.1.2 環境問題とモデルシミュレーション

では、上記のような問題にどのように取り組めばよいのだろうか。新しい制度の導入(排出権取引など)、金銭的コストの負担(技術への投資、価格の高い資源への代替など)、人々の価値観の変化への働きかけなどいくつかの手段、取り組みが考えられる。こういった対策を実施、導入する上で、(1)問題の原因と結果の因果関係の解明、(2)どのような目標へ社会を誘導すべきなのかという定量的な目標、イメージの提示、(3)各種対策の負担と得られる効果の評価、を行うことは有用である。上記のような課題を実現するのに、現在最も有効であると考えられているのが数理モデルを用いたシミュレーションである。そして、こういったモデルシミュレーションは実際にこれまで環境政策の道具として検討に使われてきた。

前項に挙げた問題の中でも、気候変動問題はモデルシミュレーションが有効に使われている環境問題の例として挙げられよう。これまでいくつかの研究チーム(京都大学・NIES、RIVM、IIASA、LBNL など)は統合評価モデルを用いて気候変動の予測、気候変動の主たる原因物質とされている温室効果ガスの排出削減コストとその削減可能量、その削減に伴うマクロ経済的影響、政策評価などを行ってきた。これらの成果は IPCC などの報告書にもまとめられ(Barker *et al.*, 2007)、世界的な政策の決定にも、国内の政策決定にも貢献してきた。上に挙げたような研究チームで用いられている統合評価モデルはいくつかのモデル群から成る。明確な区分はないが、ここではそのモデル群を3種類に分類してみる。[1]今後の経済活動、物質の生産消費量の変化、経済的な影響を推計するモデル、[2]その変化に伴う気候の応答を推計するモデル、[3]気候の応答に伴う人間活動、生態系などへの影響を評価するモデルである。このうち、[1]のモデルは経済、産業、エネルギー、農業などの活動



を表す情報を用いて、シミュレーションを行う。多くのシミュレーションモデルがそうであるように、[1]のモデルも統計情報(観測情報)を用いて、モデル内の外生変数をキャリブレートし、過去の実績をモデルに反映させることにより、シミュレーション結果に信頼性と妥当性を与える。

### 1.1.3 物質フローのシミュレーションに関する問題

前項で言及した統合評価モデルによるシミュレーションを、社会経済で生産・消費・廃棄する物質フローについても適用することができれば、今後の物質フローの制御施策を検討するための有用な知見となりうる。しかし、現状ではそのような試みが世界レベルでは行われず、散発的な国レベルの試みに終わっている(例えば、増井ら(2001))。その主たる原因は、物質のフローとストックに関する整合的なデータ、統計がないからである。ここでいう整合的なデータとは、物質別、国別で資源の採取から消費・蓄積・廃棄までの過程を詳細かつ包括的に扱うデータである。

そして、そのようなデータが得られないのは、(1)直接的にそのような計測がなされていないこと、(2)その他経済統計など各種統計から物質フローを推測するにもそれらの統計が問題を抱えていること、に由来する。例えば、森口ら(2007)は世界の貿易フローの定量化を行い、世界の物質フローを対象とした数少ない研究の一つである。図 1.3、図 1.4 は森口ら(2007)の結果の一部で 1983 年と 2003 年の世界全体の貿易量を表している。しかし、(1)信頼度が低いとされる貿易統計(COMTRADE; UN, 2006c)をそのまま使用していること、(2)各国内のフローと貿易フローとの関係が記述できないこと、という不十分な点を抱えている。

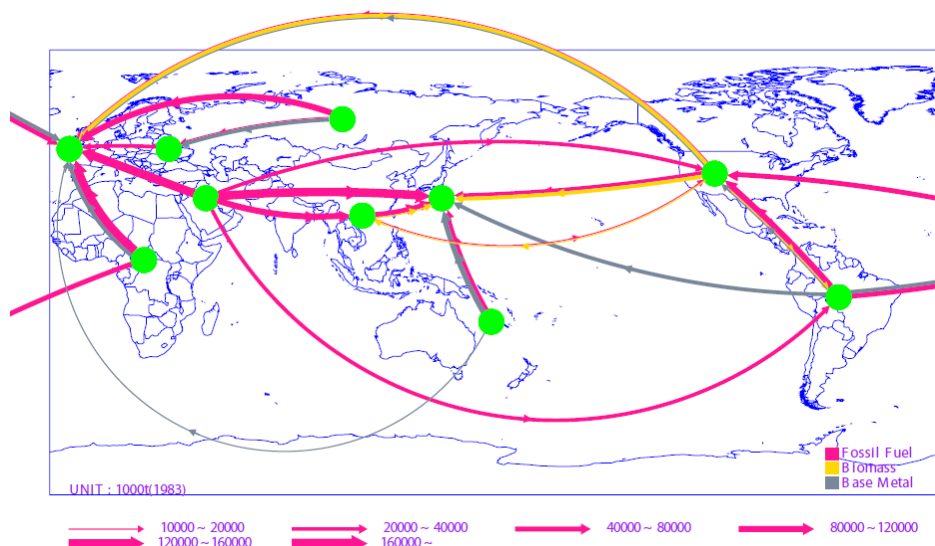


図 1.3 1983 年における全世界の貿易フロー図(森口ら, 2007)

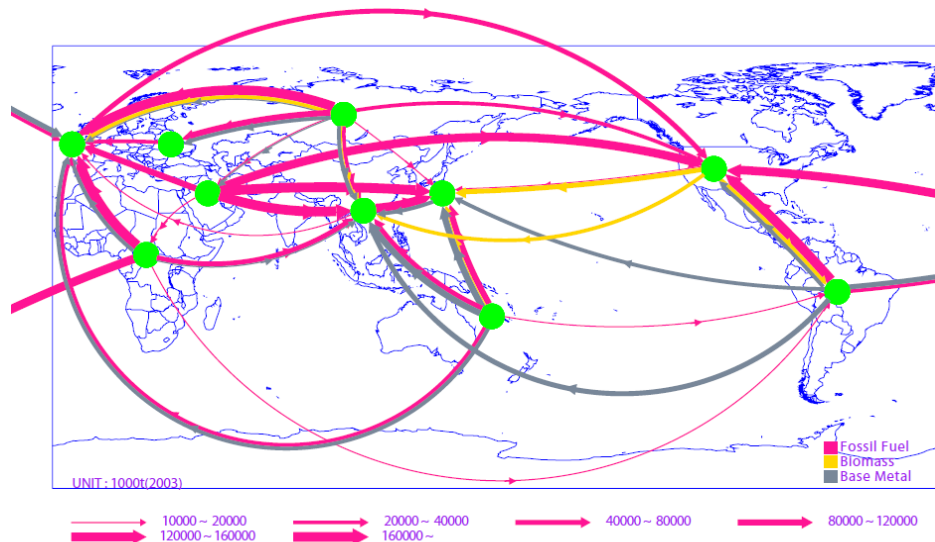


図 1.4 2003 年における全世界の貿易フロー図(森口ら, 2007)

#### 1.1.4 統計の問題

前項で、物質フローに関する統計がない、あるいは統計は存在するが問題があるということを述べた。では、我々が物質フローをする上で障害となっている統計の問題というのは一体何なのであろうか。統計情報の問題を大別すると以下の3つの問題に集約される。

- [1] ある同一事象に対して複数の情報が存在し、その情報間に不一致が存在すること
- [2] 複数の異なる事象間にある一定の関係性があると仮定でき、かつそれらの事象に対する情報が存在するが、その仮定した関係性に反する情報が存在すること
- [3] ある事象に対して情報が欠測していること

やや抽象度の高い表現を用いたのでここではそれぞれの問題について具体例を述べて、説明を加える。

まず、[1]同一事象に対する情報間の不一致は以下の例に示される。図 1.5、図 1.6 は、ドイツとインドの鉄鋼の生産量の推移を表していて、複数の統計情報をプロットしている。図中凡例の ICPSD は国連生産統計(UN, 2006a)、Mitchell は歴史統計 Mitchell(2007b, 2007c)、IISI2006、IISI2000 はそれぞれ国際鉄鋼連盟の年報 IISI(2006)、IISI(2000)を表す。いくつかの統計を並べてみると、このような明らかな不一致が見られる場合がある。ドイツの 1996 年から 2000 年における ICPSD はかなりの確率で信頼できないと判断できるかもしれないが、インドのような場合は一概にどちらがあってどちらが間違っているという判断を下すことは難しい。

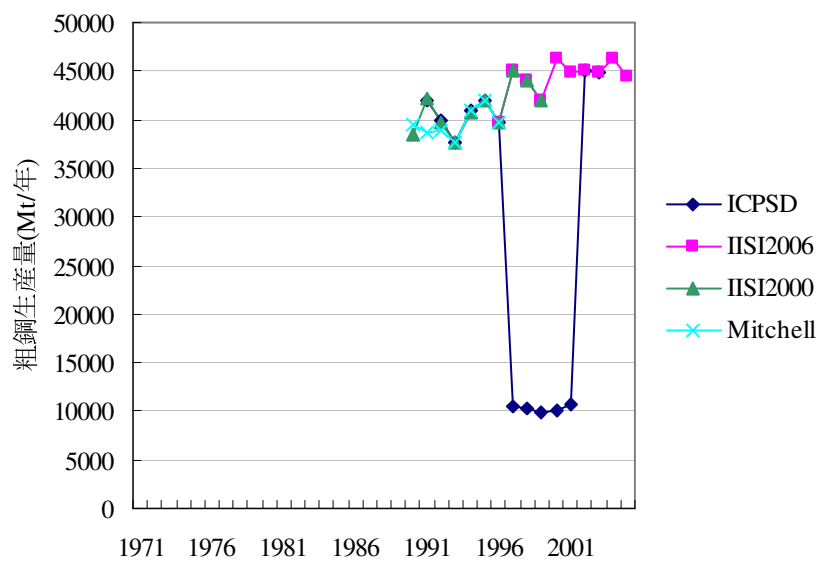


図 1.5 ドイツの粗鋼生産量

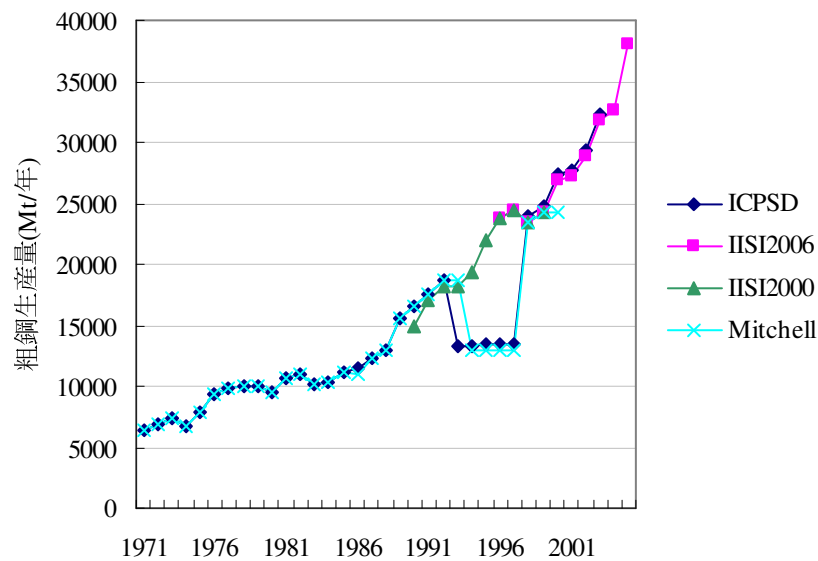


図 1.6 インドの粗鋼生産量

次に、[2]異なる事象に関する情報間における矛盾についてみる。図 1.7 はインドの製造業における生産額と付加価値額を示している。UN は国連の国民経済計算(UN, 2006b)を、WDI は世界銀行の World Development Indicators(World Bank, 2007)を表す。

一般に生産額に対する付加価値額の比というのは経年的に大きな変化は起きないものである。とりわけ製造業全体のような集約的な情報では一年で数倍も変化することは現実として考えにくい。その上で図 1.7 を見てみる。付加価値額を見ていると安定的な推移をしており、生産額に対する付加価値額は大きくジャンプしてしまう年が出現していることがわかる。直感的に生産額が妥当とは思えないような挙動をしていることがわかるが、生

産額単体で見てもこれが誤りなのかどうかという判断はできない。しかし、前述の生産額と付加価値の関係は大きく変化しないという仮定に従えば、これらの情報には誤りがあると判断できる。

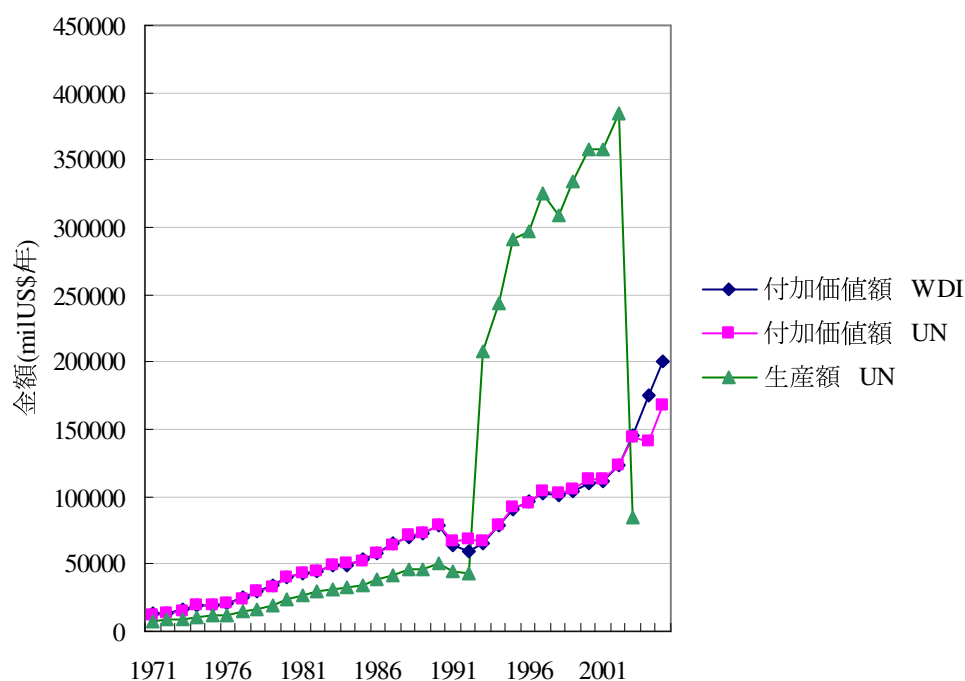


図 1.7 インドの製造業における生産額と付加価値額

最後に情報の欠測について見てみる。イタリアの自動車産業の生産額を図 1.8 に示す。図中の凡例の stan は OECD の STAN database(OECD, 2003a)、gisd は国連の工業統計(UN, 2004)、idsb、indstat は UNIDO の工業統計(UNIDO, 2007a; UNIDO, 2007b)、ssis は OECD の生産統計(OECD, 2003b)である。

それぞれの統計は対象期間が異なるが、それらを補完しながら用いても、1979 年以前の生産額が存在しないことがわかる。これが欠測であるか、それとも自動車産業が 1980 年から突然興ったのかいずれかということを断定的に述べることはできないが、欠測であると言ってよいだろう。

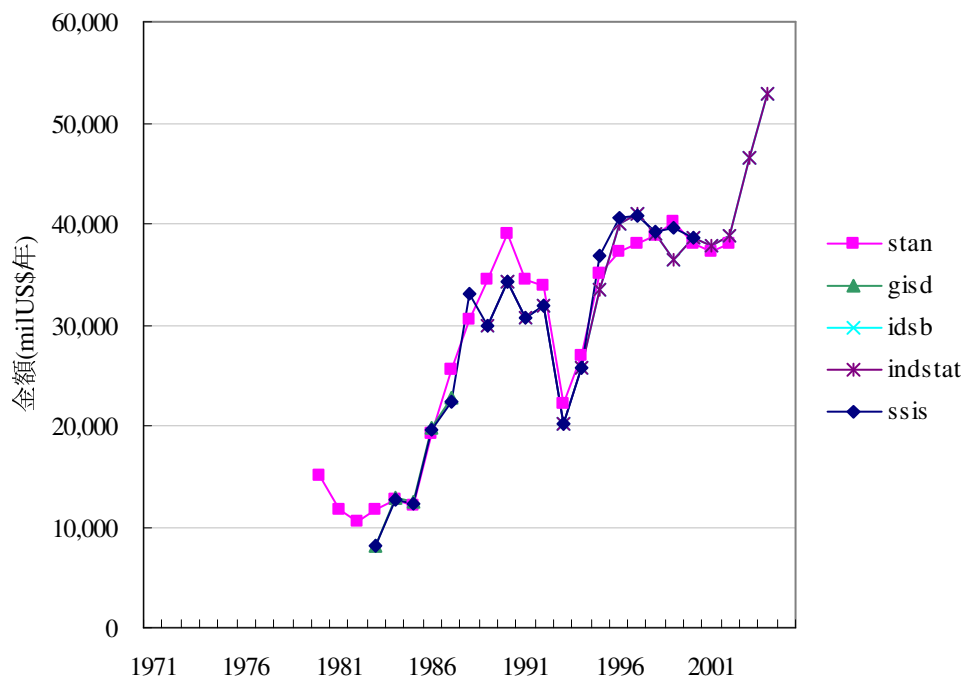


図 1.8 イタリアの自動車産業生産額

## 1.2 研究の目的

以上のような背景を受けて、本研究では「過去 30 年間における世界全域の人間活動に伴う物質フローの解明」を目的とする。本研究は以下の 4 つの物質を対象とする。その 4 つとは、生物の主要な構成元素である炭素・窒素・リン、資本ストックの主要な物質である鉄である。

上記の目的を達成するために、先に述べた既存の統計の問題を解決し、信頼性の高い貨幣フロー勘定、物質フロー勘定の推計手法を開発する。ただし、一度にすべての勘定を推計するのは、解の不安定性、(現在の計算機、ソルバーという制約と比べて)問題の規模が大きすぎるため、困難である。よって本研究では、上記の目標を達成するために以下のような手順で推計作業を行う。物質フローの推計のためにまず各国の貨幣フローを推計する。本研究で物質フローだけでなく貨幣フローも推計するのは、貨幣フローが物質フローを推定する上で有益な情報となるためだけでなく、経済モデルの入力データとしても使えるためである。そこで本研究では 2 種類の貨幣フローを推計する。第一に世界全域における地域間の財のフローを記述する貿易マトリクスであり、第二に各地域内の貨幣フローを記述する社会会計表である。次に貨幣フローを用いて物質フローの推計を行うが物質フローの推計は 3 つのパートに分けて行う。それは、a)エネルギーフロー、b)炭素・窒素・リンフロー、c)鉄フローである。

## 1.3 論文の構成

本論文の構成は以下に示すとおりである。第 2 章では、既往の研究について示す。大別して 3 種類の研究について示す。第一に物質フローに関する研究、第二に勘定体系に関する研究、第三にデータの調整方法に関する研究である。第 3 章以降は、貨幣や物質のフロ

一の推計方法の開発手法とその結果について示す。第3章では、推計の全体像と、各個別の推計においてどのような手順、方法を用いたかという一般的な方法を示す。第4章では、貿易マトリクスの構築手法の開発とその適用について示す。世界全域をカバーする貿易統計は多くの欠測と不整合を抱えていて、何らかの調整が必要となるため、その調整方法と結果について示す。第5章では、経済情報とエネルギー情報を統合して社会会計表、エネルギーIO表を構築する手法について示す。推計には Cross-entropy 法を用いた。30以上に及ぶ経済、貿易、産業、エネルギー、農業などの国際統計、国統計を用いた。結果はエネルギーフローが統計からどのように変化したかということを中心に示す。第6章では、エネルギーフローの推計手法の開発とその適用について示す。このエネルギーフローの推計は、Cross-entropy 法を用いる。前章で推計されたエネルギー財の一次エネルギー供給のデータを用いた。また、特にエネルギー転換部門の推計に重点を置いた。現在最も有用とされているエネルギー統計がいかに修正され、信頼性の高いものとなったかということを示す。第7章以降では、ここまで推計した勘定表を用いて物質フローの推計を行う。第7章では、炭素・窒素・リンの物質フローの推計手法の開発とその適用について述べる。推計は、絶対誤差和を最小とする線形計画法を用いた物質収支調整計算という手法を用いた。そして、全世界における2001年における炭素・窒素・リンフローを明らかにした。第8章では、鉄の物質フローの推計手法の開発とその適用について示す。全世界における2001年の鉄のフローを明らかにし、特に鉄を含む製品の貿易構造、経済の発展と鉄の消費に着目した。第7章、第8章ではある一時点(2001年)における物質フローが明らかとなる。しかし、単年のフローでは解析できることが少ない。そこで、第9章では、第7章、第8章で開発した物質フローの推計モデルを過去30年間に適用した。その結果、過去30年間ににおける経済と物質フローの関係が明らかとなった。最後に第10章では、本研究で得られた成果をまとめる。

## 参考文献

- [1] Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Jepma, W.A. Pizer, K. Yamaji (2007): Mitigation from a cross-sectoral perspective. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [2] IISI(International Iron and Steel Institute)(2000): Steel Statistical Yearbook.
- [3] IISI(International Iron and Steel Institute)(2005): Steel Statistical Yearbook.
- [4] IPCC(2007a): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [5] IPCC(2007b): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and

- Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.
- [6] 増井利彦、土田研一、松岡譲、森田恒幸 (2001): 応用一般均衡モデルと技術選択モデルの統合による下水汚泥処理技術の廃棄物最終処分削減への影響, 土木学会環境システム研究論文集, 29, 237-244.
  - [7] Mitchell, B.R.(2007a): International Historical Statistics Africa Asia & Oceania 1750-2005 Fifth edition, Maxmillan Publishers Ltd.
  - [8] Mitchell, B.R.(2007b): International Historical Statistics The Americas 1750-2005 Fifth edition, Maxmillan Publishers Ltd.
  - [9] Mitchell, B.R.(2007c): International Historical Statistics Europe 1750-2005 Fifth edition, Maxmillan Publishers Ltd.
  - [10] 森口祐一、橋本征二 (2007): マテリアルフローデータブック-日本を取りまく世界の資源のフロー- 第3版, 国立環境研究所.
  - [11] OECD(Organization for Economic Co-operation and Development)(2003a): The OECD STAN database for Industrial Analysis, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris.
  - [12] OECD(Organization for Economic Co-operation and Development)(2003b): Structural Statistics for Industry and Services, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris.
  - [13] OECD(Organization for Economic Co-operation and Development)(2008): OECD Environmental Outlook to 2030, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris.
  - [14] UNIDO(United Nations Industrial Development Organization) (2006a): Industrial Demand-Supply Balance Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev2, Rev3), United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Vienna.
  - [15] UNIDO(United Nations Industrial Development Organization)(2006b): Industrial Statistics Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev2, Rev3), United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Vienna.
  - [16] UN(United Nations)(2004): General Industrial Statistics Database, United Nations, New York.
  - [17] UN(United Nations)(2006a): Industrial Commodity Production Statistics Database, United Nations, New York.
  - [18] UN(United Nations)(2006b): National Accounts Statistics: Main Aggregates and Detailed Tables, United Nations, New York.
  - [19] UN(United Nations) (2006c): United Nations Commodity Trade Statistics Database, United Nations, New York.
  - [20] World Bank(2006): World Development Indicators 2006, World Bank, Washington, DC.

## 第2章 既往の研究と本研究の特徴

本研究は、物質フローの解明を目的としており、そのために物質フローデータの整備を行う。データの整備には、経済統計、物量統計、エネルギー統計等の調整を行う。そこで、本章では、本研究に関連する先行研究、取り組み等について示す。まず第一に物質フローに関する先行研究を示す。第二に物質や貨幣を記述する勘定体系の事例について示す。第三に経済データ、エネルギーデータの調整方法に関する研究について示す。統計データの調整は大別して貨幣情報のみに関する調整と、エネルギー情報と貨幣情報の両方の調整が、それらをそれぞれについて示す。最後に先行研究を踏まえた上で、本研究の位置づけと特徴について述べる。本研究の特徴は、3 つあり、第一に世界全域を対象とした物質フローの解明を行うこと、第二に有用性の高い貨幣勘定、物質勘定の作成を行うこと、第三に汎用性の高いデータの調整手法の確立することである。

### 2.1. 物質と社会経済システムに関する研究

#### 2.1.1. Kneese *et al.*(1970)の研究

Kneese *et al.*(1970)は、物質フローと社会経済システムの関係について着目し、かつ定量的な結果を出した研究であり、類似研究の中でも最も古いものである。彼らは、閉鎖された社会経済において、投入された物質は蓄積されるものを除き、廃棄物という形で自然へ排出されるという視点をもたらした。彼らによると、財の消費活動というのは実際にはある種のサービスを得るためのものであり、その物的実体は単に自然から人間を通して再び自然へ戻っているか、再利用されているかのいずれかである。彼らはこのような視点に基づきアメリカにおける 1963-1965 年の物質フロー分析を行った。そして、経済システムにおいて、物質フローに着目し廃棄物(ここでは、水質汚染物質や二酸化炭素など広義の廃棄物)管理を行う必要性を説いた。

また、産業連関表を用いた物質フローのモデルを示し、そのモデルによって環境、廃棄物政策への貢献が可能であると主張した。

#### 2.1.2. Malembaum(1978)の研究

Malembaum(1978)は、いくつかの金属資源や非金属資源の社会全体の使用量を経済発展と結びつけ、その関係性を示した。鉄をはじめとした金属資源やセメントといったような非金属資源の、一人当たり消費量を縦軸に、経済成長を横軸にとると、逆 U 字のような形状となるということを、いくつかの国のデータから示し、その曲線を **Intensity of Use 曲線**と名づけた。

しかし、Malembaum(1978)が示した **Intensity of Use 曲線**は、一部の国については当てはまるが、そうでない国も見られた。また、そこで述べられる主張は統計的な検定などによる十分な検討を経たものではなかった。さらに、**Intensity of Use 曲線**を示したグラフも実績値のみではなく、著者の想像による将来値が描かれており、彼らの主張には疑問の余地が残る。それにも関わらず、この研究成果はその後物質使用に関する常識的な知見となり、Crompton(2000)や van Vuuren *et al.*(1999)らによって将来の物質需要のモデリングに用いられていることを鑑みると、影響力は大きかった研究といえる。



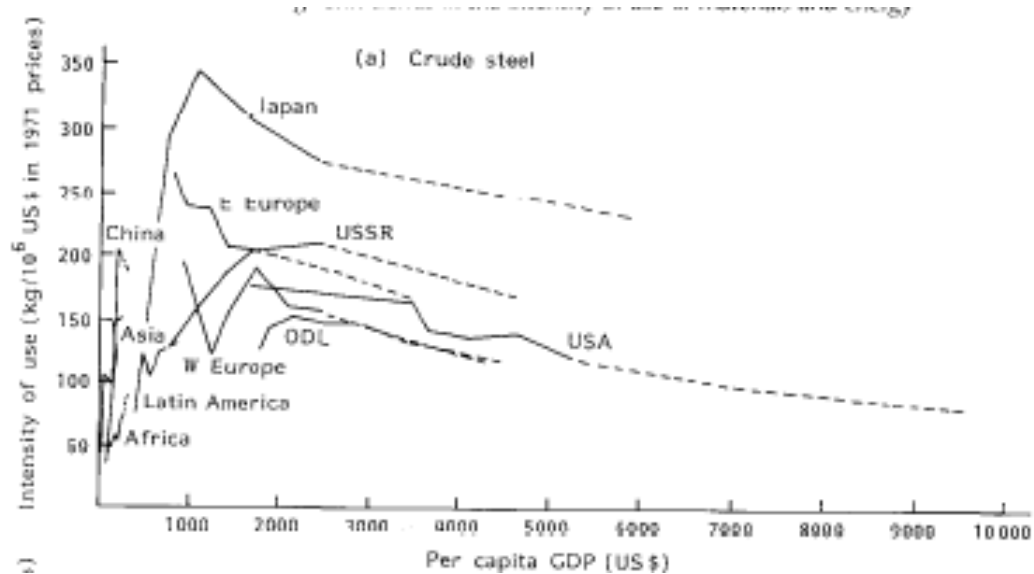


図 2.1 Malembaum(1978)が示した Intensity of Use 曲線

### 2.1.3. Matthews *et al.* (2000)の研究

Matthews *et al.*(200)は、アメリカ、日本、ドイツ、オーストリア、オランダの5カ国を対象に、1975~1996年の全物質のマテリアルフローを物量ベースで推計し、国際比較研究を行った。この研究では、自然環境と人間活動との境界をフロー計量の断面としている。これは、資源の枯渇や分配といった問題に目を向けるとともに、投入された資源はすべて潜在的に廃棄物になりうることを考慮したためである。この研究の最大の特徴は、人間活動によって引き起こされながらも、財として扱われないために従来のマテリアルフローの把握から漏れていた「隠れたフロー」に着目した点にある。「隠れたフロー」の例としては、鉱物の採取段階で掘削される表土、岩石や、選鉱段階で鉱物から分離される不純物などの、資源産出国で発生する廃棄物が典型的なものとして挙げられる。分析の主要な結果として、以下の事項が示された。

- [1] 工業社会は資源の利用効率を上昇させてきているが、廃棄物も継続的に増加させていること
- [2] 毎年人間活動に投入される資源の2分の1から4分の3の量は、廃棄物として環境に戻されていること
- [3] 化石燃料の採掘や使用が環境から人間活動へのフローの大部分を占めていることなどが示された。

## 2.2. 環境勘定、物質勘定に関する事例・研究

### 2.2.1. 国際的枠組み SEEA

物質フローの勘定体系として国際標準の体系を作成しようとした試みである SEEA について示す。SEEA は、自然環境と経済活動の相互関係の把握、および持続可能な発展のためのマクロ環境・経済指標の開発を目標に、国際連合統計部が各国の専門家の協力の下に

作成した勘定体系である。SEEA は国民勘定体系(SNA)の構成要素の一部である供給、使用表に非金融資産表（非金融資産のストック、フロー表）を組み込み、これに環境フローや環境ストックを導入することによって構築されており、SNA のサテライト体系として位置づけられている。また、SNA では扱わなかった物量に関する体系もまとめられている。

## 2.2.2. 物的産業連関表(PIOT)(Stahmer *et al.*(1997), Konijn *et al.*(1995)など)

物質フロー勘定に関する応用例として、物的産業連関表(PIOT; Physical Input-Output Table)がある。物的産業連関表は物的フローを産業連関表と同じような構造で計上したものである。物的産業連関表に関する研究の作成例としては、Stahmer *et al.*(1997), Konijn *et al.*(1995)などが挙げられる。本項では、はじめに PIOT の基本的な事項、枠組み、利点・欠点について述べ、次に PIOT の歴史的な系譜と事例について述べる。次いで、これまで行われてきた PIOT の作成方法について述べる。最後に PIOT の利用方法と問題点について述べる。

### (1) PIOT の定義

PIOT は生産活動、消費活動を行う経済主体間、経済主体と環境間の物質のフローを物量単位で記述したもので、産業連関表形式、もしくはそれを拡張した表の形式である。また、概念的にはフローのみでなくストック勘定も含めたものが提唱されているが、現在のところ実際に適用された事例はない。勘定体系は主に United Nations(1993, 2003)などで示されている SEEA に準じて作られる傾向にある。

従来の研究における PIOT は物質量を扱ったものが主流となっており、エネルギーのみを扱うエネルギーバランス表は PIOT とは呼ばれない。ただし、特定の物質のみを扱った SFA(Substantial Flow Analysis)は PIOT と称されている。その例としてオランダの鉄、アルミなどの PIOT がその一例となる(e.g. Konijn *et al.*, 1995)。

### (2) PIOT の枠組み

前述のように PIOT は、産業連関表もしくはそれを拡張した形式の表で表される。ただし、作成者によってその形式は異なるため、ここでは PIOT のより一般化された枠組みとして、Hoekstra and Bergh(2006)を参考としたものを示す(表 2.1)。

表 2.1 PIOT の枠組みの一例

	Production activities	Final Demand	Total
Commodity			
Raw materials			
Use of residuals			
Supply of residuals			
Emissions to nature			
Stock Changes			
Total			

行は主として物質で構成され、列は産業活動、最終消費などの部門で構成される。物質として、財、資源、廃棄物(投入)、廃棄物(発生)、排出物、ストック増減となる。産業連関

表と同様に、物質のフローを数字で記述する。通常それぞれの項目はさらに細分化されている。表 2.1 における枠組みでは、物質が部門へ投入されたときには該当するセルに＋の数字が記述され、部門から物質が産出、発生したときには－の数字が記述される。

### (3) PIOT の利点

PIOT はある経済システムにおける物質フローを経済活動とリンクさせて、包括的かつ詳細に記述することができるという利点を有している。また、物的産業連関分析等の経済モデルとのリンクは古くから考案されており (Kneese *et al.*(1970); Giljum and Hubacek(2003)など)、現実にもそのモデリングができれば、政策分析等の強力なツールとなると考えられる。

### (4) PIOT の欠点

PIOT は環境と経済の関係を分析する強力なツールである反面、その作成は非常に困難であるという欠点を持っている。その原因として以下の３点が考えられる。第一に、入手可能なデータが限られていることである。貨幣単位の情報はそれなりにそろっている先進諸国でも物量単位の情報は貨幣単位の情報と比べて少なく、PIOT を構築するのに十分とはいえない。第二に、物的勘定構築のための手法が確立されていないことである。入手可能なデータが少ないため、PIOT の作成は必然的に推計に頼らざるを得ないが、その手法、とりわけ貨幣勘定と物量情報の統合手法がない。これは、各種主体や財の物質収支条件を満たしつつ各統計情報と合致するようなデータ作成の困難性のためだと考えられる。第三に、推計ではなく調査等によって情報を追加的に得て PIOT を作成する場合、膨大な時間と労力を要することである。

### (5) PIOT の歴史的な系譜

PIOT にはいくつかのルーツがあるとされているが、Kneese *et al.*(1970)などで示された、社会経済における物質代謝、エネルギー・物質バランスの概念が主たるルーツであるとされている(Strasset, 2001)。

物質フロー分析の研究が盛んになり始めた 1990 年代初頭から中盤にかけて、United Nations (1993)などの SEEA(System of Environmental and Economic Accounting)により、PIOT や環境資源勘定の枠組みが提案された。それと同時平行で、実際に PIOT が作成されるようになった。最初にある経済システム全体を包含する物的勘定が PIOT という形で作成されたのはドイツであり、1990 年を対象としたものがドイツの連邦統計局より作成された (Stahmer *et al.*, 1998 など)。以降 PIOT はヨーロッパを中心として作成され、2006 年現在のところ 8 の地域と国で PIOT が作成されている (Hoekstra and Bergh, 2006)。その 8 つとは、デンマーク、フィンランド、ドイツ、イタリア、オランダ、ニュージーランド、アメリカ、EU の 8 つの国と地域である。それぞれの PIOT の特徴などについて一覧表にまとめたのが表 2.2 である (Hoekstra and Bergh, 2006)。国によって、対象年、対象物質、分類がまちまちであることがわかる。

表 2.2 PIOT の事例

	対象年	目的	財分類	対象物質	文献
デンマーク	1990	勘定	27	トータル量 エネルギー、食 料、窒素など	Gravgaard-Pedersen(1999)
フィンランド	1995	勘定	30	トータル量	Maenpaa and Muukkonen(2001)
ドイツ	1990, 1995	勘定	58	トータル量	Stahmer <i>et al.</i> (1997)
イタリア	1995	勘定	5	トータル量	Nebbia(2000)
オランダ	1990	勘定 モデリング	物質 による	セメント、紙、 鉄、亜鉛など	Konijn <i>et al.</i> (1995)
ニュージーランド	1997/1998	勘定 モデリング	48	トータル量	McDonald(2006)
アメリカ	1993	不明	3	不明	Acosta(2000)
EU	1990	モデリング	7	トータル量	Giljum and Hubacek(2001)

## (6) PIOT の作成方法

これまでいくつかの国で PIOT が作成されていながら、その推計手法に関して詳しく記述されている文献は少ない。ここでは上記の文献に共通するような典型的な作業の方法を示す。

- 金額から物質への変換には価格を用いる
- データソースは生産統計、貿易統計などとする
- 価格は国内で一定とする。場合によっては輸入、輸出価格も同じ扱いとする
- 物量情報が得られるところは固定する
- 物質収支の不一致は調整する。(具体的方法に関する記述なし)

PIOT の作成作業は各種統計データからの推計、欠測値の補完がその中心となる。現在のところ理論的もしくは体系的な PIOT の作成手法がまだ確立されていない。その理由を 2 点示す。第一に、前項でも述べたように物質データが限られていることである。第二に、推計した値は物質収支を満たしつつ得られる情報との整合性を保たなくてはならないことである。この物質収支も各産業の投入産出、財や廃棄物の投入産出という 2 つについて満たさなくてはならない。

多くの統計情報には誤りや情報間の不一致が含まれ、上記のような方法で推計をすると以下のような問題が発生する。

- [1] 誤差をどこか特定の場所に集中させてしまう
- [2] 情報の誤りを見つけることが困難

このような問題を考慮すると、PIOT の推計を行うに当たって、数理計画問題として物的フローを定式化し、複数の統計情報を同時に扱い、統計情報を相互に調整するような推計手法の確立が求められる。

## 2.3. 統計データ(貨幣フロー)の調整方法

貨幣データの調整に関する研究は、古くから存在する(例えば、Stone(1942))。これまで統計学に関する理論的な背景と適用可能性の高さから最小二乗法を用いた方法が多用され

てきた(Sefton and Weale, 1995)。また、この方法とは別に、Golan *et al.*(1996)や Robinson(2001)らの方法、情報理論を基にした Cross-entropy 法を用いる方法も提唱されている。ただし、これらの提唱された方法を我々の研究対象に適用する場合いくつかの問題が生じた。本研究は Golan *et al.*(1996)、Robinson(2001)らの Cross-entropy 法を修正した方法を適用した。そこで、本項ではまず最小二乗法とその問題点について述べ、次に Golan *et al.*(1996)、Robinson(2001)らが用いる方法の問題点を述べる。

### 2.3.1. 最小二乗法 (Sefton and Weale, 1995)

Sefton and Weale(1995)はイギリスの国民経済計算の調整を行った。ここでは、その手法と問題点をそれぞれ示す。

#### (1) 手法

データの調整法として最もよく知られている手法として最小二乗法が挙げられる。Sefton and Weale(1995)は重み付最小二乗法を用いて国民経済計算のデータ調整を行った。式体系は以下のように記述される。

推計値  $\mathbf{x}$  は、観測値  $\bar{\mathbf{x}}$  と誤差  $\boldsymbol{\varepsilon}$  を用いて以下のように表される。

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.1)$$

ここで、誤差  $\boldsymbol{\varepsilon}$  の平均値を 0、分散を既知の  $\mathbf{V}$ (信頼度)とする。

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}) = 0 \quad (2.2)$$

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}') = \mathbf{V} \quad (2.3)$$

また、推計値  $\mathbf{x}$  に対する制約として以下のものを与える。

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{s} \quad (2.4)$$

推計値  $\mathbf{x}$  は、信頼度を表すマトリクス  $\mathbf{V}$  を用いて以下のように表される。

$$\mathbf{x} = \left[ \mathbf{I} - \mathbf{V}\mathbf{A}'(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A} \right] \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{V}\mathbf{A}'(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{s} \quad (2.5)$$

式(2.5)の解は式(2.4)の制約の下、式(2.6)の関数を最小化する問題の解である。

$$(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})' \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (2.6)$$

また、 $\mathbf{V}$  については統計や観測値の種類によって値を設定する。

#### (2) 問題点

Sefton and Weale(1995)で述べられているような最小二乗法は以下の問題点がある。

第一に非負条件など不等号制約条件に関する問題である。不等号制約式の入った非線形計画問題は解析的に解くことができない。しかし、不等号制約式を入れないと解が定義にそぐわなくなる可能性がある。さらに、非負条件など不等号制約条件を追加すると解が不等号制約条件のところに集中してしまう場合がある。

第二に観測値の中で大きさに違いがある場合、相対的に小さな観測値に対応する推計値の観測値に対する変化割合が大きくなる傾向にある

以下ではそれぞれについて説明する。

#### 1) 非負条件など不等号制約条件に関する問題

Sefton and Weale(1995)が用いる方法は不等号を用いた制約条件がない場合の解析的解であった。しかし、Sefton and Weale(1995)が示した方法は観測値や分散の設定により、満足な解が得られない。これは、不等制約式が入っていないことが原因である。しかし、仮に不等号制約条件を追加したとし、数値解析的に解いたとしても、問題と思われる点が残る。以下では、まず不等号制約条件など推計値  $\mathbf{x}$  を制約するような式を入れなくてはならない理由を述べ、次に不等号制約条件を入れたときの問題点を示す。

##### i) 不等制約式が必要

Sefton and Weale(1995)が示した方法を一般に解く場合、解が定義にそぐわない場合がある。

例えば、 $\mathbf{x}$  は正の値であることがわかっているとする。しかし、 $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{s}$ 、 $\bar{\mathbf{x}}$  のとり方によって、本来負の値をとらないような  $\mathbf{x}$  が負の値になってしまう場合がある。以下はその組み合わせ例である。

ある正の  $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$  を推計するとして、 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix}$ 、 $\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 3 \end{bmatrix}$ 、 $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$  のときに、

観測値  $\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix}$  が  $10\bar{x}_1 - 6\bar{x}_2 + 9 < 0$ 、もしくは  $-5\bar{x}_1 + 3\bar{x}_2 + 15$  のとき、 $\mathbf{x}$  が負の値と

なる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [\mathbf{I} - \mathbf{V}\mathbf{A}'(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{A}')^{-1}\mathbf{A}] \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{V}\mathbf{A}'(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{A}')^{-1}\mathbf{s} \\ &= \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot 3 \\ &= \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{13} \begin{bmatrix} 3 & 6 \\ 5 & 10 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} + \frac{3}{13} \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{13} \begin{bmatrix} 10\bar{x}_1 - 6\bar{x}_2 + 9 \\ -5\bar{x}_1 + 3\bar{x}_2 + 15 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(2.7)

これは、事前に  $\mathbf{x}$  が正であることがわかっている場合、制約条件が必要であることを意味している。

##### ii) 不等制約条件の追加の問題

次に、不等制約条件を入れ、数値解析による求解を行ったとする。しかし、依然として問題が残ることを示す。上記の問題の  $\mathbf{x}$  に、非負条件を入れる。

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad (2.8)$$

そして、 $\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 1 \end{bmatrix}$  という観測値があったとし、これを数値解析的に解く。す

るとその解は以下のようなになる。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

定義や制約条件に従えば、この解は正しい。しかし、われわれは実際の問題に適用するにあたって、この解は許容されないと考えた。もし仮に、 $x_1$  と  $x_2$  がある国の労働と付加価値を表す場合などを考えると、この解は許容できないことは容易に想像がつく。

では次に、このようなパターンに対処するために、以下の式(2.10)のような制約、すなわち推計値は観測値の 10 分の 1 から 10 倍までとなる、という制約を課すとしてみる。

$$\frac{1}{10} \bar{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x} \leq 10 \bar{\mathbf{x}} \quad (2.10)$$

得られる解は、以下のとおりである。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 2.8 \\ 0.1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

先ほどの非負制約条件と同様に  $x_2$  は制約条件のところに張り付いた形となる。この解を許容するかどうかは問題の適用先によるが、我々が今回適用しようとしている問題に、妥当だとは判断しがたい。

- 2) 観測値の中で大きさに違いがある場合、相対的に小さな観測値に対応する推計値の観測値に対する変化割合が大きくなる傾向にある

前項で示した制約条件の問題とは別に、観測値の相対的な大きさの差によって、解を許容できない場合があることを示す。

前項の問題で、 $\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0.1 \end{bmatrix}$  という観測値がある場合を考えてみる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [\mathbf{I} - \mathbf{V}\mathbf{A}'(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{A}')^{-1}\mathbf{A}] \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{V}\mathbf{A}'(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{A}')^{-1}\mathbf{s} \\ &= \frac{1}{13} \begin{bmatrix} 10\bar{x}_1 - 6\bar{x}_2 + 9 \\ -5\bar{x}_1 + 3\bar{x}_2 + 15 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{13} \begin{bmatrix} 30 - 0.6 + 9 \\ -15 + 0.3 + 15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 384/130 \\ 3/130 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.12)$$

ここで、観測値に対する推計値の割合を  $\mathbf{r}$  とすると以下となる。

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 384/390 \\ 3/13 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0.98 \\ 0.23 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$x_2$  の変動比が大きいことがわかる。ただし、この点についてもやはり、許容できるかどうかという判断を客観的な尺度からは決められない。しかし、貨幣フローで値の小さい情報も物質フローにとっては重要な情報となる可能性があるため我々はこの解を許容しないとした。

### 2.3.2. Cross-entropy 法 (Golan *et al.*(1996)、Robinson(2001))

Golan *et al.*(1996)や Robinson(2001)は Cross-entropy 法を用いた産業連関表、社会会計表の調整方法を示した。また、Robinson(2001)は実際にモザンビークの社会会計表への適用を行った。ここでは手法を示し、次にその問題点を示す。

#### (1) 手法

推計されるマトリクス  $x_{i,j}$  を基準となるマトリクス  $\overline{\xi_{i,j}}$  から推定する。ここで、 $x_{i,j}$  の列和  $\overline{y_j}$  が得られたとする。そこで、列和に対する  $x_{i,j}$  の各要素  $i$  の割合を  $q_{i,j}$  とする。

$$q_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\overline{y_j}} \quad \text{where } \overline{\xi_{i,j}} > 0 \quad (2.14)$$

次に、基準となるマトリクスでも同様に列和に対する  $\overline{\xi_{i,j}}$  の各要素  $i$  の割合を  $\overline{\theta_{i,j}}$  とする。

$$\overline{\theta_{i,j}} = \frac{\overline{\xi_{i,j}}}{\overline{\psi_j}} \quad \text{where } \overline{\xi_{i,j}} > 0 \quad (2.15)$$

ここで、 $\overline{\psi_j}$  は基準マトリクスの列和を表す。次に、Kullback-Leiber の Cross-entropy 関数を用いて  $q_{i,j}$  と先の基準マトリクスから得られる  $\overline{\theta_{i,j}}$  の距離を表す。

$$-I(j) = -\sum_i q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\overline{\theta_{i,j}}} \quad (2.16)$$

Golan *et al.*(1996)に示される上記の Cross-entropy 関数の総和を最大化して、 $x_{i,j}$  を得る。

$$\max -\sum_j \sum_i q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\overline{\theta_{i,j}}} \Rightarrow \min \sum_j \sum_i q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\overline{\theta_{i,j}}} \quad (2.17)$$

ここで、



$$\overline{y_i} = \sum_j q_{i,j} \overline{y_j} \quad (2.18)$$

$$\sum_i q_{i,j} = 1 \quad \text{and} \quad 0 \leq q_{i,j} \leq 1 \quad (2.19)$$

次に、Robinson(2001)は、Golan *et al.*(1996)の方法を拡張して、列和  $\overline{y_j}$  は既知の変数ではなく、観測値から誤差を持った未知変数であるという前提を取り入れた。ここで、未知変数である列和を  $y_j$  とする。

推計値  $y_j$  に対して、ある観測値  $\overline{y_j}$  が得られたとする。統計値  $\overline{y_j}$  と  $y_j$  の差を  $\varepsilon_j$  とする。

$$y_j = \overline{y_j} + \varepsilon_j \quad \forall j \quad (2.20)$$

次に、観測値と推計値の差  $\varepsilon_j$  を以下の式で表す。

$$\varepsilon_j = \sum_h w_{j,h} \cdot \overline{v_{j,h}} \quad \forall j \quad (2.21)$$

$w_{j,h}$  は以下の式を満たす。

$$\sum_h w_{j,h} = 1, \quad 0 \leq w_{j,h} \leq 1 \quad \forall j \quad (2.22)$$

$\overline{v_{j,h}}$  は設定変数である。この式が意味するのは、観測値の誤差  $\varepsilon_j$  はある確率分布  $w_{j,h}$  を持った  $\overline{v_{j,h}}$  の期待値としてあらわされることを意味し、その確率分布は **Cross-entropy** 法に従い、以下の関数を最小化する問題で決定される。

$$\min \sum_j \left[ \sum_h w_{j,h} \cdot \ln w_{j,h} - \sum_h w_{j,h} \cdot \ln \frac{1}{n} \right] \quad (2.23)$$

ここで、 $n$  は  $\overline{v_{j,h}}$  の要素  $h$  の数を表す。

そして、これらの問題を一つの計画問題として記述した。

$$\min \sum_j \sum_i p_{i,j} \ln \frac{p_{i,j}}{q_{i,j}} + \sum_j \left[ \sum_h w_{j,h} \cdot \ln w_{j,h} - \sum_h w_{j,h} \cdot \ln \frac{1}{n} \right] \quad (2.24)$$

## (2) Robinson(2001)や Golan *et al.*(1996)の方法の問題点

最小二乗法のとおり同じような問題が依然として残る。すなわち、非負条件など不等号制約条件に関する問題である。不等号制約式を入れないと解が定義にそぐわなくなる可能性がある。しかし、非負条件など不等号制約条件を追加すると解が不等号制約条件付近に集中してしまう場合がある。また、観測値の大きさが大きいものほど修正量の比が小さくなる傾向にあるという問題もある。

### 2.3.3. RAS 法 (Bacharach, 1970)

RAS 法は産業連関表の調整を行う伝統的な手法である。RAS 法は行方向と列方向に係数をかけていき、行和と列和のバランスが取れた産業連関表を得るというものである。RAS 法を適用するにはいくつかの前提が必要となる。(1)基準となる産業連関表がえられること、(2)産業連関表の生産額、付加価値額、最終消費額が部門別で得られること、(3)行和列和はマトリクスのバランスに矛盾しないこと、などである。

RAS 法は数理計画モデルによる定式化は必要なく、簡便な繰り返し計算を用いることで解が得られ、利便性がよい反面欠点もいくつか持っている。第一に各部門の生産額、付加価値額、最終消費額に関する情報は信頼できるものであり、かつそれらをすべてそろえる必要があることである。第二に、データのパターンによっては解が存在しないことがある。RAS 法は投入係数の調整を中間投入部分のみで行うため、付加価値の調整が行われない。従って、列の投入係数の和が 1 であり、それぞれの要素は非負となる条件を満たすことができないデータのパターンもありうる。第三に行和列和以外に得られる産業連関表に関する情報を推計値に反映させることができないことである。

## 2.4. 貨幣フローとエネルギーフローの調整に関する研究

### 2.4.1. Rutherford *et al.*(1998)の方法

現在 GTAP(Dimaranan, 2006)は貨幣データとともにエネルギーデータも実装している。しかし、Rutherford *et al.*(1998)らが応用一般均衡モデルを用いたエネルギー需給のシミュレーションに取り組む頃はそのようなデータを実装していなかった。そこで、Rutherford *et al.*(1998)は産業連関と整合性のあるエネルギー投入産出表を調整した。エネルギーデータとして IEA の Energy Balance(IEA, 2007 の古い版)を用いて作成している。

その方法は、最小二乗法による定式化であり、2 段階の調整を行う。1 段階目は世界各地域の輸出入のバランスを考慮したエネルギー財の生産量、輸出入量、国内供給量の調整である。2 段階目は、その結果を用いた各国の貨幣の産業連関表の調整である。

Rutherford *et al.*(1998)の方法は、エネルギーデータを信頼し、貨幣データを一方的に調整している。これはエネルギーデータが信頼度が高いものである場合、許容できるが、実際にはそうではなく、エネルギー、貨幣ともにデータに誤りがある可能性を排除できないため問題がある。また、2.3.1 項で示した最小二乗法の問題も存在する。

### 2.4.2. GTAP の方法(Malcolm, 1999)

Rutherford の指摘を受けて GTAP でも独自にエネルギー IO 表を作成した。GTAP は Rutherford よりも豊富なデータと詳細なステップで推計している。Malcolm(1999)では複雑な作業手順を示しているが、まとめるとそのステップは以下の 5 つに集約される。

- ① Volume データをチェック
- ② Price データの収集。必要な部分を補完
- ③ Volume の作成(貿易のエネルギーと貨幣フローの調整)
- ④ 各地域別の産業連関表を Cross-entropy 法で調整し、マクロ経済指標などとの整合を図る。

⑤ 金額データと物量データから RAS 法を用いてエネルギーIO 表を作成。

GTAP は価格、数量、金額、税金など膨大なデータを集め、かつ詳細な手順で、世界全域をカバーするエネルギーに関する投入産出表、貨幣に関する社会会計表、世界全体の貿易マトリクスを推計した。他に類似するようなデータが存在しないため、現在世界的にも多くの研究で用いられているが、データを精査すると、既存の統計との不一致という問題も指摘されている。

## 2.5. 本研究の特徴と位置づけ

以上のような既往の研究とそれらの問題点を踏まえて、本研究の特徴を述べる。大別して3つの特徴がある。

○ 世界全域を対象とした物質フローの解明を行うこと

過去の物質フロー研究は、各国レベル、もしくは EU といった地域単位が最も広い対象であったが、本研究では世界全域を対象とする。物質フローの側面から地域の特徴などを明らかにし、世界全体を対象とした環境戦略のための重要な知見を与える。

○ 汎用性の高いデータの調整手法の確立

本研究は広範囲にわたる統計を用いて、様々な情報に基づいた貨幣と物質のデータを作成する。既往の研究で行われてきたデータの調整はデータの精度が比較的高い先進国を中心としてきた。そのため本章で示したようにデータの精度が低い場合、既存の方法では妥当な解が得られないことがある。本研究ではデータの質の低い途上国も扱うため、精度の低いデータが混入してきた場合にも応用できるような汎用性の高い調整方法を開発する。過去にこのような手法は類を見ない。

○ 有用性の高い貨幣勘定、物質勘定の作成

本研究では部門分類、地域分類が統一された貨幣、物質のデータを作成する。またその貨幣と物質データは整合性を持つ。それにより、地域、国間で物質フローの比較分析が可能となるだけでなく、モデルシミュレーションに使うデータとしても有用である。

## 参考文献

- [1] Bacharach, M. (1970): Biproportional matrices and input-output change, Cambridge, Cambridge University.
- [2] Crompton, P.(2000): Future trends in Japanese steel consumption, Resource Policy, **26**, 103-114.
- [3] Giljum, S. and K. Hubacek (2001) International Trade, Material Flows and Land Use: Developing a Physical Trade Balance for the European Union, Interim Report IR-01-059, IIASA, Laxenburg.
- [4] Dimaranan, V. D.(2006): Global Trade, Assistance, and Production The GTAP 6 Data Base,

Center for Global Trade Analysis, Purdue University.

- [5] Golan, A., G. Judge, and D. Miller(1996): Maximum Entropy Econometrics: Robust Estimation with Limited Data, John Wiley & Sons Ltd, England.
- [6] Gravgård-Pedersen, O. (1999) Physical Input-Output Tables for Denmark. Products and Materials 1990, Air Emissions 1990-92, Statistics Denmark, Copenhagen.
- [7] Hoekstra R. and C.J.M. van den Bergh (2006): Constructing physical input-output tables for environmental modeling and accounting: Framework and illustrations, *Ecological Economics*, **59**(3), 375-393.
- [8] IEA(International Energy Agency)(2007): Energy Balance of OECD countries, International Energy Agency, Paris, France.
- [9] Kneese, A.V., R. U. Ayres and R. C. D'arge(1970): Economics and the Environment, A materials balance approach, Resources for the future, Inc., Washington, D.C..
- [10]Konijn, P.J.A., S. de Boer and J. van Dalen (1995): Material Flows and Input-Output Analysis: Methodological Description and Empirical Results. Notanr: 006-95-EIN.PNR/int BPA-nr: 698-95-EIN.PNR/int, Sector National Accounts, Statistics Netherlands, The Netherlands.
- [11]Mäenpää and J. Muukkonen (2001) Physical input-output in Finland: methods, preliminary results and tasks ahead, Conference on Economic Growth, Material Flows and Environmental Pressure, Stockholm, Sweden.
- [12]Malcolm, G. and T. P. Truong(1999): The Process of Incorporating Energy Data into GTAP, Draft GTAP Technical Paper.
- [13]Malenbaum, W.(1978): World demand for raw materials in 1985 and 2000, McGraw-Hill, New York.
- [14]Matthews, E., Bringezu, S., Fischer-Kowalski, M., Huettler, W., Kleijn, R., Moriguchi, Y., Ottke, C., Rodenburg, E., Rogich, D., Schandl, H., Schuetz, H., van der Voet, E., and Weisz, H. (2000): The weight of nations, Material outflows from industrial economies World Resources Institute, Washington.
- [15]McDonald, G.W. and M. G. Patterson(2006): Development of a New Zealand Physical Input-Output Table, Intermediate Input-Output Conference, Sendai, Japan.
- [16]Nebbia, G., Contabilià (2000): monetaria e contabilit? ambientale, *Economia Pubblica* 30 (6), pp. 5-33.
- [17]Robinson, S., Cattaneo, A. and El-Said, M. (2001): Updating and estimating a social accounting matrix using cross entropy methods, *Economic Systems Research*, **13**(1), 47-64.
- [18]Rutherford, T.F. and M. Babiker (1998): GTAP-E: A Global Energy-Economy Dataset, University of Colorado Department of Economics.
- [19]Sefton J. and M. Weale(1995): Reconciliation of national income and expenditure Balanced Estimates of National Income for United Kingdom 1920-1990,Cambridge University Press.
- [20]Stahmer, C., M. Kuhn and N. Braun (1998): Physical Input-Output Tables for Germany, 1990, Working Paper No. 2/1998/B/1, European Commission.
- [21]Stone, J. R. N., Champernowne, D. G., and Meade, J. E.(1942), The Precision of National

- Income Estimates, *Review of Economic Studies*, **9**(2), 11 1-125.
- [22] Strassert, G. (2001): Physical input-output accounting, in Ayres, R. U. and L.W. Ayres, "A Handbook of Industrial Ecology", Edward Elgar, USA.
- [23] UN(United Nations) (1993): Handbook of National Accounting: Integrated Environmental and Economic Accounting, Studies in Methods United Nations, New York.
- [24] UN(United Nations) (2003):Integrate Environmental and Economic Accounting 2003, United Nations, New York.
- [25] van Vuuren, D. P., B.J. Strengers, and H.J.M. de Vries(1999): Long-term perspectives on world metal use- a model-based approach, RIVM report , Vol.461502 021.

### 第3章 研究の全体像と手法の概要

本章では、本研究の全体像、すなわち本研究の目的である物質フローの解明をどのような手順で行うかということを示す。本研究ではいくつかのパートに分けて推計を行う。(1) 貨幣の貿易マトリクスを作成し、次に(2)各地域の貨幣勘定を作成する。次に(3)エネルギーの投入産出表を作成し、(4)炭素・窒素・リン・鉄の物質勘定表を構築する。それぞれの推計作業では、ある典型的な方法、手順に基づいた推計作業を行う。そこで、その典型的な作業、方法を示す。その典型的な作業は5つに分類される。すなわち、[1]得たい情報の決定、[2] 勘定体系の決定、[3]データの問題点の同定と推計、調整を行う方針の決定、[4]推計手法の決定、[5]推計手法の適用である。

#### 3.1 推計の全体像

##### 3.1.1 概要

世界全域の過去 30 年程度の物質勘定を推計するためには、貨幣勘定が必要不可欠となる。これは、物量情報よりも貨幣情報のほうが観測値が多いことに由来する。従って、物質フローの推計の前にまず貨幣フローの推計を行う。その貨幣フローは、財の投入産出構造を表す産業連関表、社会会計表といった各地域、国内の貨幣フローを扱う情報と、各国間の貿易のやりとりを表す情報が必要となる。そこで、これらを別々に推計する。以上の点を踏まえて本研究は以下のフロー図(図 3.1)に示すような手順で推計作業を行う。

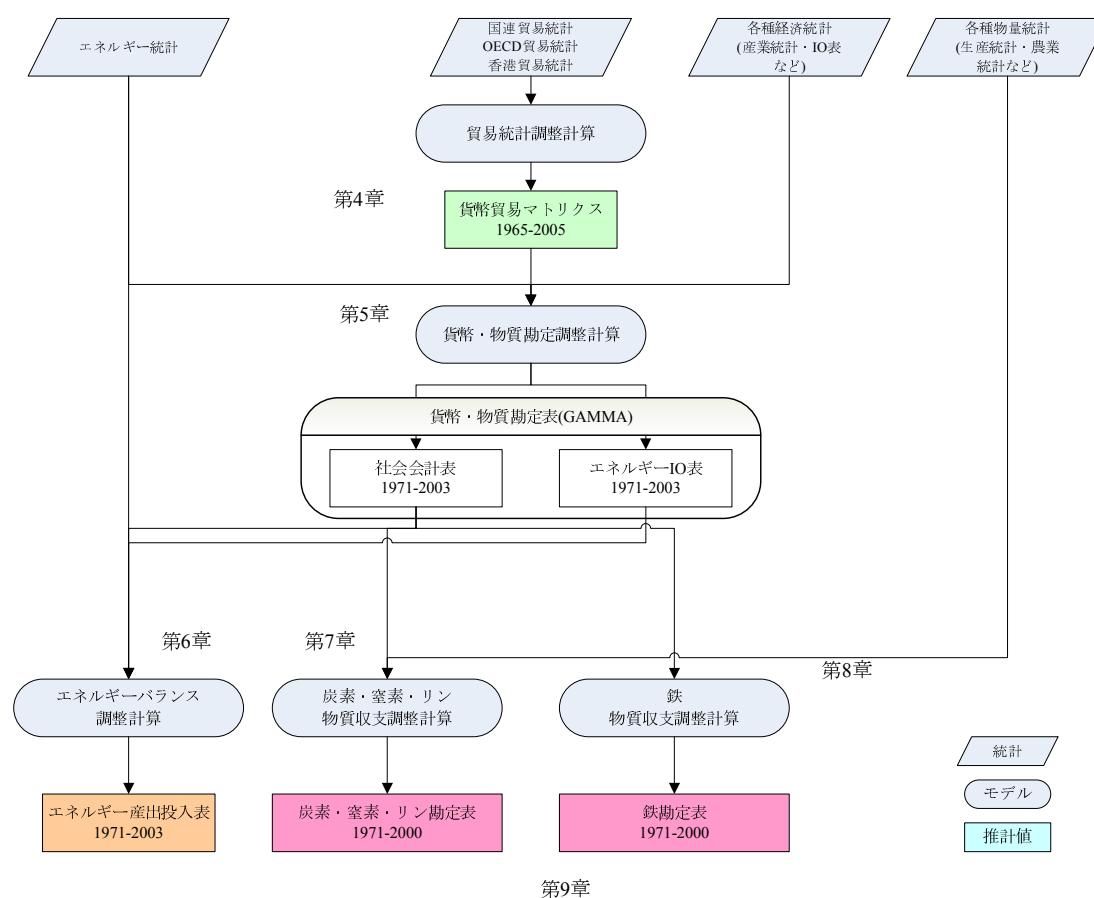


図 3.1 推計の全体像

まず、(1)貨幣の貿易マトリクスを作成し、次に(2)貨幣勘定表を作成する。GAMMA の貨幣勘定は社会会計表である。次にその貨幣勘定を用いて、(3)エネルギー産出投入表、(4)炭素・窒素・リン勘定表、(5)鉄勘定表を作成する。

### 3.1.2 貨幣貿易マトリクスの作成(第4章)

まず、貨幣の貿易マトリクスを作成する。世界全体をカバーする貿易統計として唯一存在するのは、COMTRADE(UN, 2006)である。ただし、COMTRADE にも問題がある。それは、(1)ある貿易のやりとりに関して注目した場合、報告国によって異なる値をとること、(2)欠測が存在し、とりわけ途上国に関してはその問題が顕著であること、などである。これらの問題を解決し、世界全体の貿易マトリクスを財別に作成する。推計には絶対誤差を最小化する線形計画法を用いる。COMTRADE だけでなく複数の統計を観測情報として用いること、財の分類のうち、集約的な分類の情報と細かい分類の情報を同時に用いることで上記の問題を解決する。その推計結果である貿易マトリクスを、次のステップで行う各国の地域内の社会会計表の推計で用いる。

### 3.1.3 社会会計表とエネルギー財の IO 表の作成(第5章)

次に、社会会計表とエネルギー財の IO 表を作成する。世界全域をカバーする貨幣勘定は GTAP version6(Dimaranan, 2006)が唯一といってよいが、その GTAP には少なくとも2つの問題がある。第一に、対象期間が限られるということである。今回の物質フローの推計は過去数十年間にわたるものであるが、GTAP は 2001 年のみが対象年である。第二に、GTAP のデータの一部には各種国際統計との不一致が見られることである。そこで、こういった問題を解決することを試みる。また、ここでは貨幣フローのみでなく、エネルギーフローとの整合性も取れている社会会計表を作成するために、エネルギー財の生産、輸出入情報を追加し、同時にエネルギー財の IO 表を作成する。

推計は1年ずつ行う。推計作業は、各地域別の推計作業と世界全体の貿易収支をとる推計作業の2種類に分類でき、それらを交互に繰り返し用いる。両推計作業ともに Cross-entropy 法を用いて定式化する。

### 3.1.4 エネルギー投入産出表の作成(第6章)

次に、エネルギー投入産出表を作成する。現在世界を対象としたエネルギー統計の中でも IEA の Energy Balance(IEA, 2007a, 2007b)は最も有用であるとされている。しかし、その Energy Balance も少なくとも以下の3つの問題を抱える。第一に、部門・国によってはエネルギー転換効率が物理的上限を越えることであること、第二に時系列変化を見たときに、不適切と思われるものが含まれること、第三に欠測があることである。そこで、これらの問題を解決し、世界全域を対象としたエネルギーの投入と産出を表す勘定表を作成する。推計には貨幣勘定の推計と同様に Cross-entropy 法を用いる。ここでは、前項で推計されるエネルギーIO表のうち、生産量、輸出量、輸入量を外生変数として用いる。

### 3.1.5 全世界炭素・窒素・リン物質勘定表、鉄勘定表の作成(第7章、第8章)

次に、全世界炭素・窒素・リン・鉄物質勘定表を作成する。炭素、窒素、リンのフローは、食料の生産消費に関連するフロー、木材の生産消費に関連するフロー、化石燃料の生産消費に関連するフロー、肥料の生産消費に関連するフローを扱う。これらのフローに関する統計情報は断片的なものであり、貨幣フローと物質フローに関する情報を調整することで、人間活動由来の炭素、窒素、リンフローを推計する。

勘定体系として、各主体の物質の産出フローを記述する産出表、投入フローを記述する投入表、貿易フローを記述する貿易表の3種類の勘定体系を定義した。観測情報(統計値)と推計値の絶対誤差、物質の価格の絶対誤差を最小化する線形計画法を用いた手法を提案する。そして、単年(2001年)にその手法を適用した(第7章)。

そして次に、鉄のフロー勘定を作成する。鉄に関する統計情報も炭素・窒素・リンと同様に断片的なものしか得られない。そこで、貨幣フローと物質フローの情報を調整し、鉄のフローを推計する。手法は炭素、窒素、リンの推計手法を用いて、その手法を2001年に適用した(第8章)。

### 3.1.6 過去30年間の物質フローの推計とその解析(第9章)

前項の推計手法は線形計画法を用いた物質収支調整計算である。しかし、その手法には改善の余地がある。そこで次にその手法の問題点を指摘し、最小二乗法を用いた非線形計画問題のほうがより妥当な解を得られることを示す。そして、その手法を1971年から2000年について適用し、炭素、窒素、リン、鉄の物質フローの推計を行う。それらを経済活動の指標などと比較し、過去30年間で物質フローはどのように変化してきたのかということ明らかにする。

## 3.2 推計の方針

前節では本研究がいくつか推計作業に分けて貨幣、物質のフローを推計していくことを示した。それらの各推計作業では典型的な方法、手順を用いる。ここではその典型的な推計の方法、手順を示す。

### 3.2.1 典型的な推計作業の方法・手順の概要

図3.2は、その典型的な推計方法、手順を表している。以下の5つの作業を行う。

- (1) 得たい情報の決定
- (2) 勘定体系の決定
- (3) データの問題点の同定と推計、調整を行う方針の決定
- (4) 推計手法の決定
- (5) 推計手法の適用



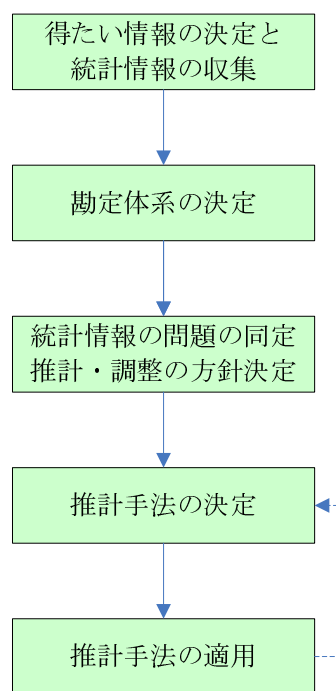


図 3.2 典型的な推計方法と手順

以下では、それぞれの作業について説明する。

### 3.2.2 得たい情報の決定と統計情報の収集

各推計ステップにおいて、得たい情報が何であるのかを明確にする。例えば、エネルギーフローの推計のために、産業連関表が必要となり、そのためには、生産額、輸出額、輸入額のデータが必要であるといったことである。その情報を得るためには、どのような統計情報あるいは、その情報を推計するのに役立つ統計以外の情報(例えば、燃料の転換効率の物理的上限、物量をエネルギー量に換算する係数など)があるかを把握し、収集する。

#### 3.2.3 勘定体系の決定

次に、得たい情報を一つの勘定体系に記述するために、勘定表の枠組みを決定する。勘定表として情報をまとめる利点は以下のものが挙げられる。

- (1) 情報の解析、シミュレーションに用いるのに便利である
- (2) 情報同士の整合性のチェックが可能である

これまで国を対象とした勘定表の中でも一般的に用いられてきたのは貨幣のフロー、ストックを記述する国民経済計算である。国民経済計算は、Stone(1942)の提案より何度かの改訂を経て現在の体系となっており、現在でもその有用性は高いとされている。貨幣フローと同じような、国を対象とした物質フロー、ストックの勘定の体系化はここ 10 年程度の間に進んできており(SEEA ;UN, 2003 など)、物質勘定と経済勘定を同一体系にまとめることは、環境負荷の分析、シミュレーションに有効であるとされている。勘定表の枠組みの決定作業では、対象とする部門分類、財や物質などの分類の決定も行う。

### 3.2.4 統計データの問題点の同定と推計、調整を行う方針の決定

定義した勘定体系に従い、各種フローを推計するために統計情報を用いるが、その統計情報にはどのような問題があるのかを同定する。その統計の問題によって、推計作業は欠測の補完が主たる作業なのか、情報は揃っているがクオリティが低いので、その修正が主たる作業なのかといった方針を決定する。

### 3.2.5 推計手法の決定

統計情報の問題、勘定表の体系などを踏まえて、推計手法を決定する。このときは以下の3点を考慮する。

- ・ 推計は単一の計画問題として記述できるか否かを考える。
- ・ もし複数の計画問題を用いるとしたらどのような手順でそれらを組み合わせるべきなのかを決定する。
- ・ それぞれの計画問題はどのような基準、指標を最適化すべきかを決定し、関数形を決定する。

複数の計画問題を用いて推計するかどうかという判断は、問題の大きさに大きく依存する。すなわち、現在の計算機の計算能力、最適化ソルバーの能力の制約により、大規模の問題を扱えない場合がある。また、上記の能力の制約に加えて推計したときの解の安定性の確保のためにも問題の大きさは極力小さくする必要がある。用いる数式体系の中に非線形性の強い関数が入っていると、解の安定性が低くなる。

### 3.2.6 推計手法の適用

上記で決定した手法を実際に適用する場面では、事前に予想できなかった統計情報の問題が浮上してくることがある。そのようなときには再び、推計手順をさかのぼり、修正すべき点を修正する。

## 3.3 まとめ

本章では、本研究の全体像とその推計手順を示した。物質フローの解明のために、貨幣や物質のデータの調整・推計作業を複数の手順に分割する。まず、(1)貨幣の貿易マトリクスを作成し、次に(2)各地域の貨幣勘定を作成する。次に(3)エネルギーの投入産出表を作成し、(4)炭素・窒素・リン・鉄の物質勘定表を構築する。それぞれの推計作業では、ある典型的な方法、手順に基づいた推計作業の方法があり、その典型的な作業は5つに分類される。すなわち、[1]得たい情報の決定、[2]勘定体系の決定、[3]データの問題点の同定と推計、調整を行う方針の決定、[4]推計手法の決定、[5]推計手法の適用、である。

次章以降では、実際の手法とその適用結果について示す。

## 参考文献

- [1] Dimaranan, V. D.(2006): Global Trade, Assistance, and Production The GTAP 6 Data Base, Center for Global Trade Analysis, Purdue University.
- [2] IEA(International Energy Agency)(2007a): Energy Balance of OECD countries, International

Energy Agency, Paris, France.

- [3] IEA(International Energy Agency)(2007b): Energy Balance of non-OECD countries, International Energy Agency, Paris, France.
- [4] Stone, J. R. N., Champernowne, D. G., and Meade, J. E.(1942), The Construction of tables of national income, expenditure, savings and investment, The Economic Journal, 51(202/203), 216-233.
- [5] UN(United Nations)(2003):Integrate Environmental and Economic Accounting 2003, United Nations, New York.
- [6] UN(United Nations) (2006c): United Nations Commodity Trade Statistics Database, United Nations, New York, USA.

## 第4章 貿易マトリクスの構築

一般的に、貿易統計はデータの信頼性に問題があるとされている。これまで、この貿易統計を補完、調整し、より信頼性と実用性の高い貿易データの作成が試みられてきた(Gehlhar(1996)、Feenstra *et al.*(2005))。しかし、彼らの作成したデータにも改善の余地がある。そうした背景を踏まえ本研究では、実用性と信頼性の高い貿易データ作成を行う手法の開発を行った。この手法は、可能な限り多くの統計(観測)情報を用いて、推計値とその観測情報との乖離が小さくなるようにしようというものである。ここでいう多くの統計情報とは、(a)複数の貿易統計、(b)それぞれの貿易統計の収録している情報の財分類の粗いものと詳細なものの情報である。その結果、従来の研究と比べて欠損の補完や調整を体系的に行えるようになった。

また、本手法を 1965 年から 2003 年に適用した。推計値と貿易統計を OECD 諸国について比較すると、北米、西欧圏の国の修正量は小さい傾向にあったが、東欧圏の国の修正量は大きい傾向にあった。財別で見た場合、燃料等の資源の修正量が大きかった。

### 4.1 はじめに

世界全体を網羅した貿易データは、世界を対象とした経済、環境などのシミュレーションを行うのに有用なものである。例えば、GTAP (Dimaranan, 2006)や LINK Project などに見られるように、貿易データは世界全体の経済動向のシミュレーションで使用されており、実際の政策決定にも寄与してきた。また、経済のみならず他の分野にも用いられている。例えば、環境分野におけるシミュレーション、分析がその一つの例である(Kainuma *et al.*, 2002)。

現在、世界を対象とした貿易統計はいくつか存在する。その中でも国連が発行する COMTRADE (COMmodity TRADE)(UN, 2006)は最も情報量が豊富である。COMTRADE はその情報量の豊富さにより、その他の貿易統計(例えば、OECD 発行の ITCS(International Trade by Commodity and Statistics))のデータ源、あるいは経済分析等の研究のデータとして用いられている。しかし、COMTRADE だけでなく一般的に貿易統計はデータの信頼性に問題があるとされている(Gehlhar, 1996)。その問題とは、(1)データの欠測、(2)報告国間でのデータの不一致が見られること、(3)統計によって報告値が異なること、などである。そこで、これまでこの貿易統計を補完、調整し、より信頼性が高い貿易データの作成が試みられてきた(Gehlhar(1996)、Feenstra *et al.*(2005))。そして、これらのデータは有償または無償で一般ユーザーが使えるデータとなっている。

しかし、彼らが作成した貿易データにはいくつか問題がある。例えば、Feenstra *et al.*(2005)は財分類、対象国ともに詳細であるが、輸出報告を排除して輸入報告を優先的に採用してデータ作成を行っている。Gehlhar(1996)でも述べられていることであり、後述することでもあるが、輸入・輸出報告のどちらがより信頼できるかということは一概に言えない。一方、Gehlhar(1996)は両報告値の信頼性を推定し、その情報を基にして、システムティックに貿易データの作成を行った。しかし、Gehlhar(1996)を基に作成された GTAP(Dimaranan, 2006)は旧ソ連のデータが欠損している。また、ユーザーが使えるデータは財分類が粗く、詳細な財や国などを分析するには十分なデータとは言いがたい。

本研究では、Gehlhar(1996)の貿易データ作成手法をさらに発展させ、Gehlhar(1996)より信頼性が高いデータ作成を可能とする調整方法を開発した。具体的には以下の二点を工夫した。第一に財分類の粗い情報と細かい情報を一度に扱う調整計算を行うこと、第二にバイラテラルな貿易統計を複数扱うことである。そこで、本論文では貿易データ作成の方法を示し、実際の適用結果を示す。

## 4.2 貿易統計とその問題点

### 4.2.1 貿易統計

外国貿易とは一国(もしくは関税地域)の国境を越えて、流入、流出する財の商取引である(Kinoshita *et al.*, 1995)。また、この取引の内容を記録したものを(外国)貿易統計と呼ぶ。通常各国は財が通関したときにその取引を計上し、報告する。ただし、ヨーロッパにおいては EC、EU 市場の統合により、通関したときの貿易として計上するのではなく、域内貿易として計上している。

いくつかの国際機関はこれらの報告値を加工・整理し、貿易統計集として発行している(以降この統計を国際貿易統計と呼ぶ)。一般に、国際貿易統計は以下のような特徴を持つ。

- 計上価額は輸入、輸出で異なる。
- 輸入は仕出し価額に輸入国の国境までの運送、保険料、輸出税(貿易補助金)を加えた額(C.I.F; Cost, Insurance and Freight)、輸出は輸出国の国境における甲板、レール、車両、飛行機渡し価額(F.O.B; Free On Board)を用いる。
- 関税についてはこれらの価額には反映されない。
- 計上数量は、重量、長さ、面積等がある。適用地域は当該国の関税地域のほかに、自由地帯などがある。統計期間は原則として暦年(1月1日から12月31日)である。

### 4.2.2 バイラテラル貿易統計

前項で示した貿易統計は、大別して2種類に分かれる。一つは各報告国の輸入量、輸出量のみの情報を持つものであり、もう一つは報告国に加え貿易相手先の情報を持つもの(以降この統計をバイラテラル貿易統計と呼ぶ)である。主要な国際機関が発行しているバイラテラル貿易統計を表 4.1 に示す。

表 4.1 国際機関発行のバイラテラル貿易統計一覧

発行機関(者)	データ名	略称	収録データ	対象年	財分類
UN	UN Commodity trade	COMTRADE	bilateral trade data	1962-2005	SITC, HS etc
OECD	International Trade by Commodity Statistics	ITCS	bilateral trade data	1961-2003	SITC, HS
UNCTAD / WTO/IMF	World Integrated Solution	WITS	bilateral trade data tariff etc	1965-2005	HS
FAO	World Agricultural Trade Matrix	WATM	bilateral trade data	1986-2005	FAO commodity classification

各統計の特徴を簡単に示す。UN の COMTRADE は世界全域をカバーする。対象年は 1962 年から直近の年であり、財分類は SITC(Standard International Trade Classification)、HS(Harmonized System)を扱っている。また、COMTRADE は他の貿易統計のデータ源とも

なっている。

OECD の ITCS(International Trade by Commodities Statistics)(OECD, 2005)は 1961 年から 2003 年までのデータを収録している。財分類は COMTRADE と同様に SITC、HS を扱っているが、報告国が OECD 加盟国と一部の非 OECD 諸国に限られる。COMTRADE とともにデータの共有を行っており、概ね COMTRADE と同じ値を収録している。しかし、ITCS の一部は COMTRADE と大きく異なる値であったり、あるいは COMTRADE では欠損であった部分を ITCS では収録しているものもある。これは、ITCS が UN に加えて、EUROSTAT、OECD 独自の調査というデータ源を持っていることが要因になっていると考えられる。また、COMTRADE でカバーできない台湾のデータを所有していることも ITCS の特徴である。

UNCTAD の WITS(World Integrated Trade Solution)(UNCTAD, ホームページ)は関税データや IMF の Balance of Payment とをあわせたデータを収録する。貿易データ自体は COMTRADE の転用である。

FAO の WATM(World Agricultural Trade Matrix)(FAO, 2005)は農業関連財に特化したデータであるが、収録年数が 1986 年から最近の年となっており短い。また、品目分類は貿易統計で一般的な SITC や HS ではなく、FAO の分類である。

#### 4.2.3 貿易統計の問題

前項で示したバイラテラル貿易統計はデータの信頼性に問題があるとされている(Gehlhar, 1996)。例えば、ある国  $r$  からある国  $s$  へ財  $i$  が貿易される場合を考えると、国  $r$  の輸出報告と国  $s$  の輸入報告の 2 つの報告がなされる。このときに、以下の 4 つの問題がある。

- [1] 片方で欠損がある
- [2] 二つの報告値を比較した場合にデータの不一致が見られる
- [3] SITC や HS の財分類における上位桁と下位桁の整合性が取れていない
- [4] 統計により報告値が異なる。

このような問題が起こる理由として以下の 3 点が考えられる(Yeats(1995)、Kinoshita *et al.*(1995))。第一に不可避なギャップである。これは、F.O.B と C.I.F の価額の差、年をまたがる貿易のタイムラグ、為替レート、貿易先の変更等による。第二に、各国による報告システムの相違である。これは計上時の下限金額、中継貿易の計上の方法、財分類等の相違などによる。第三に意図的操作である。輸入関税等の税金を抑えるための過小評価報告による。

これらの問題は国、財、年などにおいて体系的なギャップや欠測があるわけではなく、ランダムに発生しているため、問題の原因を究明してそれらに対処するというのは困難である。

#### 4.2.4 貿易統計の問題に対する対処

それでは、上記の問題を踏まえたうえで、貿易マトリクスを作成するにはどのような方法が採用されうるであろうか。必要な要件を列挙する。

- (1) CIF を FOB へ変換する係数を推計する

- (2) 片方が欠測している部分は報告値のある側で補完する
- (3) 報告値の信頼度を推計する
- (4) 双方に報告がある場合はその報告の間に推計値があるようにする。ただし、いずれの報告値に近いほうが望ましいかというのは、その報告値の信頼度による
- (5) 財の集約度に応じた情報を相補完的に用いる
- (6) 得られる統計情報をすべて用いる

4.3 節以降では、上記の要件を満たす貿易マトリクスの推計方法を示す。

## 4.3 推計の方法

### 4.3.1 推計の対象と推計されるもの

本研究では F.O.B 価格の貿易マトリクス(財×輸出国×輸入国×年の 4 次元データ)を作成する。対象年は 1965 年から 2003 年、対象地域は全世界 292 の国と地域である。財分類は対象期間で 2 種類に分かれる。1965 年から 1985 年は SITC の revision1、1986 年から 2003 年は SITC の revision2 を用いた。また SITC の revision1,2 は 1 桁から 4 桁までのすべての財を対象とした。

### 4.3.2 使用した統計

本研究では 2 つのバイラテラル貿易統計 COMTRADE と ITCS を使用した。COMTRADE を用いた理由は、COMTRADE が様々な貿易統計のデータ源となっており、現在最も詳細かつ広範囲にデータを収録しているためである。COMTRADE に加えて ITCS を用いた理由は以下の 2 点である。第一に、財の分類が SITC であり、COMTRADE と同時に扱うことが容易であること、第二に ITCS は EUROSTAT、OECD 独自の調査という COMTRADE にないデータ源をもっていることである。

### 4.3.3 推計の概要

図 4.1 に本研究の貿易データ作成方法の概要を示す。本研究の推計方法は 4 つの処理に大別される。図中ではこれらの 4 つの処理がボックスで表されていて、それぞれ(1)Manual reconciliation (手作業による最適化計算前の調整)、(2)conversion of C.I.F into F.O.B(C.I.F 報告値の F.O.B への換算)、(3)reliability calculation(信頼値計算)、(4)Reconciliation of SITC Total and 1-digit (貿易総量と SITC1 桁の調整)、(5)Reconciliation of SITC from 1-digit to 4-digit(SITC1 桁から 4 桁の調整)である。処理(1)、(2)と(3)は COMTRADE、ITCS それぞれで行い、元のデータから C.I.F の F.O.B への換算、信頼値の推計を行う。次に、処理(2)、(3)で得られた結果を用いて、財すべての合計量である貿易総量と SITC の 1 桁の推計を行う(4)。さらに処理(2)、(3)、(4)の結果を用いて SITC1 桁から 4 桁までの推計を行う。処理(4)、(5)では、COMTRADE、ITCS の値を同時に扱い、最適化計算を行う。処理(4)、(5)は本来同時に処理されるべきであるが、計算機の制約上これは不可能であった。そこで本研究ではこれらを分割して最適化計算を行った。以下ではそれぞれの処理についてその概要を示す。

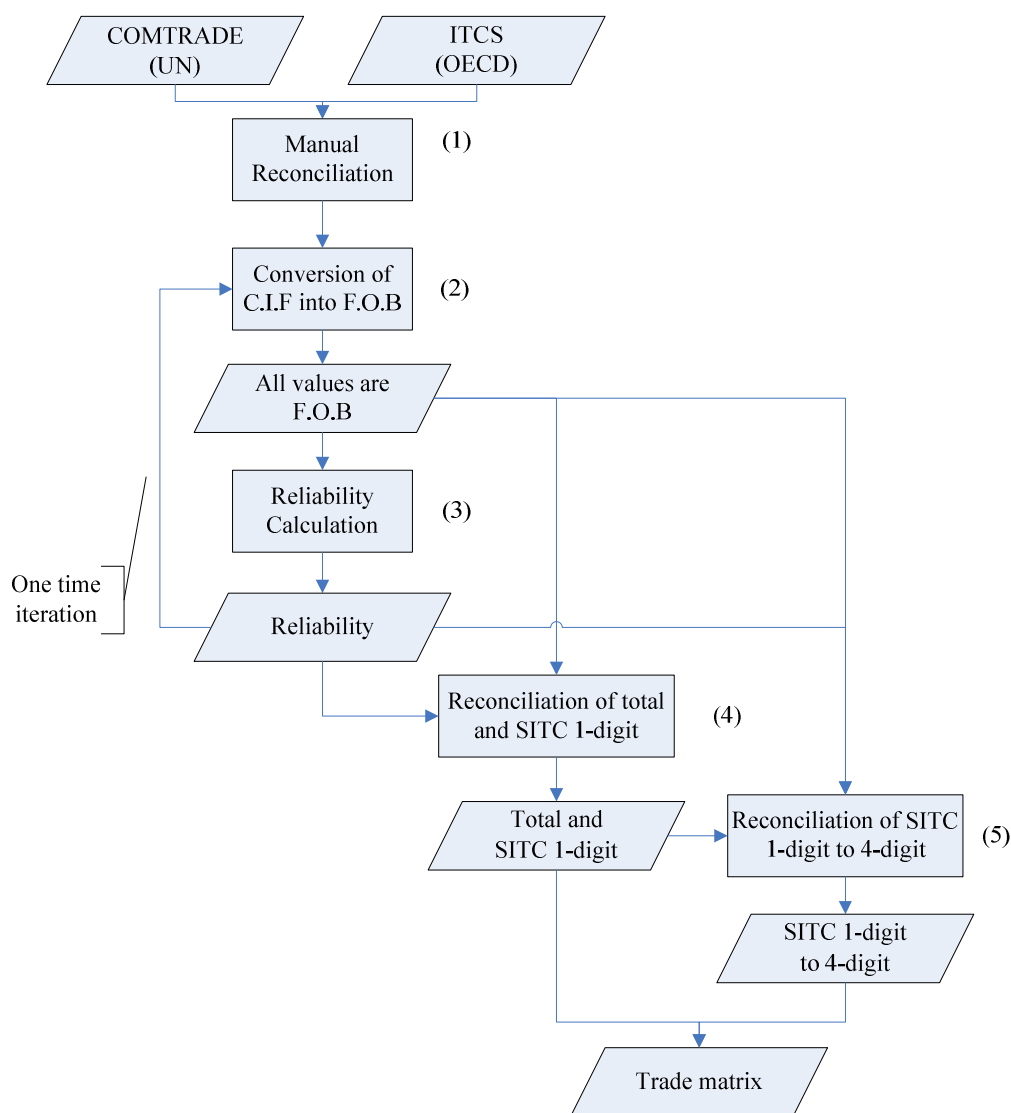


図 4.1 推計手法の概要図

(1) Manual reconciliation (手作業による最適化計算前の調整)

後の最適化計算の前にデータの補間を行う。これは、後述する最適化計算時では修正できない部分の補間を行うためであり、主として Feenstra *et al.*(2005)で指摘された部分について修正する。

(2) Conversion of C.I.F into F.O.B (C.I.F 報告値の F.O.B への換算)

COMTRADE、ITCS データのうち、輸入報告値は C.I.F ベースで報告されている。本研究で構築するデータベースは F.O.B ベースの貿易量であるため、輸入報告値を F.O.B に換算する。換算係数は、COMTRADE、ITCS をそれぞれ用いて推計する。換算係数の計算は 2 度行う。1 度目はすべての報告値を使って計算を行う。2 度目は後述する信頼値計算の結果より得られる信頼値を用いて、信頼性が高い報告値のみを採用して、換算係数を計算する。

(3) Reliability Calculation(信頼値計算)



4.2.3 で述べたように各国がそれぞれ報告している輸出入量には、誤りを持っている可能性がある。そこで、本研究ではそれぞれの報告値に信頼性を表す信頼値を推計し、処理(2)の2度目の計算、処理(4)、(5)の計算に用いる。信頼値は、年×財分類×国の3次元データであり、輸入、輸出報告それぞれについて計算する。この方法は主として Gehlhar(1996)を参考とした。

#### (4) Reconciliation of Total and SITC 1-digit (貿易総量、SITC1 桁の調整)

処理(1)、(2)、(3)で得られた F.O.B ベースの輸出入データ、信頼値を用いて、各国の貿易総額、SITC1 桁レベルの財の貿易量を調整計算する。この処理の特徴をまとめると以下の3点である。第一に、計算に線形計画法を用いること、第二に SITC の1桁の合計と貿易総額との整合性が取れるように定式化を行うこと、第三に複数の貿易統計を同時に扱い調整を行うことである。この処理で得られる SITC1 桁レベルの推計値は次の処理(5)において固定値として扱われる。

#### (5) Reconciliation of SITC from 1-digit to SITC 4-digit(SITC1 桁から4桁の調整)

処理(1)、(2)、(3)、(4)で得られた F.O.B ベースのデータ、信頼値、SITC1 桁レベルの財貿易量を用いて、SITC1 桁から4桁までの貿易量を調整計算する。(4)と同様に線形計画法を用いて、複数の貿易統計を同時に扱う。また、この処理では SITC の1桁から4桁まで上位桁と下位桁の関係が整合性を保つように定式化する。

以降ではそれぞれの作業について詳しく述べる。式中に用いられる文字式と集合の一覧は付録に示す。

### 4.3.4 Manual reconciliation (手作業による最適化計算前の調整)

自動的な最適化計算では扱いきれない問題を事前に処理しておく必要がある。ここでは、3点修正を行った。第一に、SITC の財コードの 93(Special transactions, commodity not classified according to class)とその93に属する下位桁のカテゴリーの財(例えば、931、9310)についての修正であり、第二に相手国が特定されていない貿易の修正、第三にそれ以外の修正である。

第一の修正においては、SITC の財コードの 93(Special transactions, commodity not classified according to class)とその93に属する下位桁のカテゴリーの財の報告値をゼロとした。これは Feenstra *et al.*(2005)でも指摘されていたようにロシアなど一部の国では、本来どこかの財の報告であるべきものが分類不明として報告されているためである。これにより分類されなかった財の貿易量は最適化計算の過程において、他の財に振り分けられることになる。

次に、第二の相手国が特性されていない貿易の修正について述べる。相手国が不明な分類として”Area nes”、”Bunkers”、”Free zone”、”Special Categories”の4つを扱った。そして、これらの報告値をゼロとした。

第三の修正は、2点行った。一つ目は COMTRADE において貿易相手国の”Other Asia nes”を台湾として扱うことである。二つ目はある年だけが欠測しているが、前後の年には報告

がある場合、その前後の年を用いて補間するというものである。ある財のある国間での貿易 3 年分を抽出してきたときに真ん中の年に欠測が見られる場合、その欠測を前後の年の平均を用いて補間した。これにより例えば COMTRADE の日本の報告は 1992 年が完全に欠測しているが、そのような報告を補間することができる。

#### 4.3.5 Conversion of C.I.F into F.O.B (C.I.F 報告値の F.O.B への換算)

C.I.F で報告されている輸入量を F.O.B に換算する。前述のように換算係数の計算は二度行うが、一度目の換算係数  $\gamma_{i,t}'$  の推計には、式(4.1)を用いる。式中の財  $i$  は SITC の revision1、revision2 の 1 桁から 4 桁までのすべての品目を表す。ただし、本来  $\gamma_{i,t}'$  は輸出国、輸入国によって変化するが、データの制約により、本研究では輸出国、輸入国に関係なく一定値と仮定した。

$$\gamma_{i,t}' = \frac{\sum_{r,s \in Rx1} \overline{X_{i,r,s,t}^{fob}}}{\sum_{r,s \in Rx1} \overline{M_{i,r,s,t}^{cif}}} \quad \forall i \in I, t \in T \quad Rx1 = \left\{ r, s \mid \overline{X_{i,r,s,t}^{fob}} \cdot \overline{M_{i,r,s,t}^{cif}} > 0 \right\} \quad (4.1)$$

ここで、

$\overline{M_{i,r,s,t}^{cif}}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入報告値(C.I.F)

$\overline{X_{i,r,s,t}^{fob}}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告値(F.O.B)

$\gamma_{i,t}'$ :  $t$  年における財  $i$  の輸入報告値 C.I.F から F.O.B への換算係数(一度目の計算)

集合  $I$  は財全体の集合、 $T$  は年の集合、 $Rx1$  は  $t$  年のある財  $i$ 、国  $r$  から国  $s$  への貿易で、輸出側、輸入側両方に報告がある国の組み合わせの集合をさす。

2 度目の計算では、信頼値を考慮し、式(4.2)を用いる。信頼値が  $\alpha$  以上のもののみを採用して  $\gamma_{i,t}$  の計算を行う。信頼値の計算方法については次項で示す。

$$\gamma_{i,t} = \frac{\sum_{r,s \in Rx2} \overline{X_{i,r,s,t}^{fob}}}{\sum_{r,s \in Rx2} \overline{M_{i,r,s,t}^{cif}}} \quad \forall i, t \quad Rx2 = \left\{ r, s \mid \overline{X_{i,r,s,t}^{fob}} \cdot \overline{M_{i,r,s,t}^{cif}} > 0, RIM_{i,s,t} > \alpha, REX_{i,r,t} > \alpha \right\} \quad (4.2)$$

ここで、

$\overline{RIM_{i,s,t}}$ :  $t$  年における財  $i$ 、国  $s$  の輸入報告の信頼値

$\overline{REX_{i,r,t}}$ :  $t$  年における財  $i$ 、国  $r$  の輸出報告の信頼値

$\alpha$ : 信頼値の許容値(本研究では 0.67 とした)

$Rx2$  は  $t$  年のある財  $i$ 、国  $r$  から国  $s$  への貿易で、輸出側、輸入側両方に報告があり、かつ両方の報告の信頼値が  $\alpha$  以上である国の組み合わせの集合をさす。

#### 4.3.6 Reliability Calculation(信頼値計算)

ある貿易取引があるときに、その報告値がどれほど信頼できるかという指標を作る。この手法は主として Gehlhar(1996)を参考とした。

まず、前項で得られた F.O.B ベースの輸入値  $\overline{M_{i,r,s,t}^{fob}}$  とそれに対応する輸出のミラーデータ (貿易相手国からの報告値)  $\overline{X_{i,r,s,t}^{fob}}$  との比較を行い、その一致度  $\overline{AL_{i,r,s,t}}$  を式(4.4)で計算する。  
 $\overline{AL_{i,r,s,t}}$  が 0 に近いほど輸入と輸出の報告が一致していることを意味する。

$\overline{\gamma_{i,t}}$  を用いて輸入報告値を F.O.B 換算する。

$$\overline{M_{i,r,s,t}^{fob}} = \overline{\gamma_{i,t} M_{i,r,s,t}^{cif}} \quad \forall i \in I, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.3)$$

ここで、 $R$ 、 $S$  は国の集合を表す。

$\overline{M_{i,r,s,t}^{fob}}$  :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入額推計値(F.O.B)

$$\overline{AL_{i,r,s,t}} = \frac{|\overline{M_{i,r,s,t}^{fob}} - \overline{X_{i,r,s,t}^{fob}}|}{\max(\overline{M_{i,r,s,t}^{fob}}, \overline{X_{i,r,s,t}^{fob}})} \quad \forall i \in I, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.4)$$

ここで、

$\overline{AL_{i,r,s,t}}$  :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告と輸入報告の一致度

国  $r$  の財  $i$  の輸出入それぞれに対して、報告値の全体のうち、一致度  $\overline{AL_{i,r,s,t}}$  の値がある一定以下の報告の占める割合を信頼値とする。式(4.5)から式(4.7)に、 $t$  年における財  $i$ 、国  $r$  の輸入報告の信頼値  $\overline{RIM_{i,s,t}}$  の算出方法を示す。

$$\overline{MR_{i,s,t}^T} = \sum_r \overline{M_{i,r,s,t}^{fob}} \quad \forall i \in I, s \in S, t \in T \quad (4.5)$$

$$\overline{MR_{i,s,t}^A} = \sum_{r \in R \times 3} \overline{M_{i,r,s,t}^{fob}} \quad \forall i \in I, s \in S, t \in T \quad R \times 3 = \{r : \overline{AL_{i,r,s,t}} < 0.33\} \quad (4.6)$$

$$\overline{RIM_{i,s,t}} = \frac{\overline{MR_{i,s,t}^A}}{\overline{MR_{i,s,t}^T}} \quad \forall i \in I, s \in S, t \in T \quad (4.7)$$

ここで、

$\overline{MR_{i,s,t}^T}$  :  $t$  年における財  $i$  の国  $s$  の輸入量総量

$\overline{MR_{i,s,t}^A}$  :  $t$  年における財  $i$  の国  $s$  の輸入報告のうち、ミラーデータとの一致度が高い報告の総

量(ここでは、一致度が高いという基準を  $\overline{AL_{i,r,s,t}} < 0.33$  とした)

輸入報告と同様に輸出報告についても信頼値の計算を行う。

$$\overline{XR_{i,r,t}^T} = \sum_s \overline{X_{i,r,s,t}^{job}} \quad \forall i \in I, r \in R, t \in T \quad (4.8)$$

$$\overline{XR_{i,r,t}^A} = \sum_{s \in Rx4} \overline{X_{i,r,s,t}^{job}} \quad \forall i \in I, r \in R, t \in T \quad Rx4 = \{s : \overline{AL_{i,r,s,t}} < 0.33\} \quad (4.9)$$

$$\overline{REX_{i,r,t}} = \frac{\overline{XR_{i,r,t}^A}}{\overline{XR_{i,r,t}^T}} \quad \forall i \in I, r \in R, t \in T \quad (4.10)$$

ここで、

$\overline{XR_{i,r,t}^T}$  :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  の輸出量総量

$\overline{XR_{i,r,t}^A}$  :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  の輸出報告のうち、ミラーデータとの一致度が高い報告の総量(ここでは、一致度が高いという基準を  $\overline{AL_{i,r,s,t}} < 0.33$  とした)

#### 4.3.7 Reconciliation of Total and SITC 1-digit (貿易総量と SITC1 桁の調整)

本項の処理では、全財の貿易総量、SITC1 桁レベルの財の貿易量を調整計算する。ここまでの処理は COMTRADE、ITCS それぞれのデータで行う処理であったが、本項の処理は COMTRADE、ITCS 両方のデータを同時に用いて最適化計算を行う。

$t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易量における調整値を  $Y_{i,r,s,t}$  とする。

次に、各国の貿易総量と SITC の 1 桁レベルの合計との関係を表した制約式を式(4.11)で表す。

$$Y_{i,r,s,t} = \sum_{i \in I_1} Y_{i,r,s,t} \quad \forall i \in I_0, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.11)$$

次に、前項までに定義してきた同貿易における輸出入報告  $\overline{X_{i,r,s,t}^{job}}$ 、 $\overline{M_{i,r,s,t}^{cif}}$ 、C.I.F の F.O.B 換算係数  $\gamma_{i,t}$  に統計種  $f$  (COMTRADE、ITCS) という次元を加えて、各文字式を定義し直す。輸出報告値、輸入報告値、C.I.F から F.O.B への換算係数をそれぞれ  $\overline{X_{f,i,r,s,t}^{job}}$ 、 $\overline{M_{f,i,r,s,t}^{cif}}$ 、 $\overline{\gamma_{f,i,t}}$  とする。これらの輸出、輸入における報告値と調整値との乖離度  $\epsilon_{f,i,r,s,t}^X$ 、 $\epsilon_{f,i,r,s,t}^M$  を用いて、報告値と調整値の関係を式(4.12)、式(4.13)で表す。

$$Y_{i,r,s,t} = \overline{M_{f,i,r,s,t}^{cif}} \cdot (1 + \epsilon_{f,i,r,s,t}^M) \quad \forall f \in F, i \in I_0 + I_1, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.12)$$

$$Y_{i,r,s,t} = \overline{X_{f,i,r,s,t}^{job}} \cdot (1 + \epsilon_{f,i,r,s,t}^X) \quad \forall f \in F, i \in I_0 + I_1, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.13)$$

ここで、

$\epsilon_{f,i,r,s,t}^M$  : 貿易統計種  $f$ 、 $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入報告と調整値の乖離

度

$\varepsilon_{f,i,r,s,t}^X$ : 貿易統計種  $f$ 、 $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告と調整値の乖離度

ここで、集合  $I_0$  は全財の貿易総量を、 $I_1$  は SITC の 1 桁の財分類の集合を表す。 $F$  は統計種の集合を表す。上述した乖離度とその統計情報の重みの積の総和が最小となるように  $t$  年の財  $i$  における目的関数を式(4.14)とする。

$$\min \sum_{f,r,s \in Rx5} \overline{w_{f,i,r,s,t}^M} \cdot |\varepsilon_{f,i,r,s,t}^M| + \sum_{f,r,s \in Rx6} \overline{w_{f,i,r,s,t}^X} \cdot |\varepsilon_{f,i,r,s,t}^X| \quad \forall i \in I_0 + I_1, t \in T \quad (4.14)$$

ここで、

$\overline{w_{f,i,r,s,t}^M}$ : 貿易統計種  $f$ 、 $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入報告の乖離率に対する重み

$\overline{w_{f,i,r,s,t}^X}$ : 貿易統計種  $f$ 、 $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告の乖離率に対する重み

ここで、 $Rx5$  は輸入報告が存在する統計  $f$ 、報告国  $r$ 、相手国  $s$  の集合、 $Rx6$  は輸出報告が存在する統計  $f$ 、報告国  $r$ 、相手国  $s$  の集合である。

式(4.11)から(4.14)を線形計画問題として扱い未知変数  $Y_{i,r,s,t}$ 、 $\varepsilon_{f,i,r,s,t}^M$ 、 $\varepsilon_{f,i,r,s,t}^X$  を求解した。また、本研究では乖離率に対する重みを以下のように仮定した。

$$\overline{w_{f,i,r,s,t}^M} = \overline{\gamma_{f,i,t}} \cdot \overline{M_{f,i,r,s,t}^{cif}} \cdot \overline{RIM_{f,i,t}} \quad \forall f \in F, i \in I, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.15)$$

$$\overline{w_{f,i,r,s,t}^X} = \overline{X_{f,i,r,s,t}^{fob}} \cdot \overline{REX_{f,i,r,t}} \quad \forall f \in F, i \in I, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.16)$$

#### 4.3.8 Reconciliation of SITC from 1-digit to 4-digit(SITC1 桁から 4 桁の調整)

本処理は前項の Reconciliation of Total and SITC 1-digit と同様の概念を用いる。ただし、Reconciliation of Total and SITC 1-digit の方法に以下の二点の変更を加える。第一に、式(4.12)から式(4.14)の財  $i$  に対する集合  $I_0 + I_1$  を SITC1 桁から SITC4 桁までのすべての財の集合  $I_{all}$  とすること。第二に、制約式(4.11)の代わりに SITC 各桁の関係を表す式(4.17)から式(4.19)を制約式として用いることである。ここで、ある SITC 上位桁  $I_{upper}$  に対応する SITC 下位桁  $I_{lower}$  の集合を  $I_{lower}^{I_{upper}}$  のように記述する。また、集合  $I_2$  は SITC2 桁の財、集合  $I_3$  は SITC3 桁の財、集合  $I_4$  は SITC4 桁の財を表す。

$$Y_{i,r,s,t} = \sum_{i \in I_2^{I_1}} Y_{i,r,s,t} \quad \text{where} \quad \sum_f \sum_{i \in I_2^{I_1}} \overline{X_{f,i,r,s,t}^{fob}} + \overline{M_{f,i,r,s,t}^{cif}} > 0 \quad \forall i \in I_1, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.17)$$

$$Y_{i,r,s,t} = \sum_{i \in I_3^{I_2}} Y_{i,r,s,t} \quad \text{where} \quad \sum_f \sum_{i \in I_3^{I_2}} \overline{X_{f,i,r,s,t}^{fob}} + \overline{M_{f,i,r,s,t}^{cif}} > 0 \quad \forall i \in I_2, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.18)$$

$$Y_{i,r,s,t} = \sum_{i \in I_4^{I_3}} Y_{i,r,s,t} \quad \text{where} \quad \sum_f \sum_{i \in I_4^{I_3}} \overline{X_{f,i,r,s,t}^{fob}} + \overline{M_{f,i,r,s,t}^{cif}} > 0 \quad \forall i \in I_3, r \in R, s \in S, t \in T \quad (4.19)$$

式(4.17)から式(4.19)の where 以下の条件は、ある財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易に関して、

すべてのデータ種  $f$  中に  $i$  より下位桁の輸出入報告がないときに制約式として扱わないことを意味する。これは、下位桁情報がなくなった時点で、それよりも下位桁の情報を推計せず、上位桁で止めておくことを意味する。

## 4.4 結果

### 4.4.1 世界全体の貿易総額

世界全体の貿易総額の経年変化を表 4.2 に示す。表 4.2 には (1)本研究推計値、(2)WTF(World Trade Flows; Feenstra *et al.*(2005))の C.I.F 価格、(3)WTF の F.O.B 価格、(4)GTAP 6 database(Gehlhar(1996)の最新版)、(5)COMTRADE の輸出報告値、(5)COMTRADE の輸入報告値(F.O.B 価格)が示されている。WTF は C.I.F 価格を主として採用しているため、本研究より得られた C.I.F、F.O.B の変換係数  $\gamma$  を用いて、F.O.B 価格であらわした取引額を F.O.B 価格とした。COMTRADE の輸入額についても  $\gamma$  を用いて C.I.F 価格で表したものを示している。本研究推計値に対する各統計値、データの割合を括弧の中に示した。また、図 4.2 に、本研究推計値の各年の貿易総額を 1 としたときの各統計、データの割合を示す。

まず、F.O.B 価格の WTF と本研究推計値を比較すると、1990 年代前半まで概ね本研究のほうが大きな値を示し、1997 年以降は WTF のほうが若干大きな値を示した。GTAP や COMTRADE と比べると WTF はほぼすべての年において本研究推計値と最も近い値を示している。ただし、図 4.2 を見ると WTF は 1978 年、1983 年において急激な変化が見られる。この部分については事項で詳しく見る。

GTAP の値と本研究推計値を比較すると、本研究の数値は全般に大きな値を示している。各年を平均すると GTAP の値は本研究推計値の 92%であり、最も乖離が大きかった年では 87%(1968 年)であった。1990 年頃までは徐々に本研究の値と近くなり、1991 年で 97%となったが、1992 年以降急激に下がり、90%付近となった。1999 年以降は再び 95%程度で推移している。

COMTRADE と本研究推計値を比較すると、輸出報告、輸入報告ともに 90~95%付近を推移していることがわかる。また、近年になるほど本研究と近い値を示すようになっている。ただし、1992 年では輸出入両報告とも急激な落ち込みが見られる。

表 4.2 本研究推計値と統計、他研究の貿易総額の経年変化(bil US\$)

年	本研究推計 値	WTF (CIF)	WTF (FOB)	GTAP	COMTRADE exports	COMTRADE imports (FOB)	$\gamma_{i,j}$
1965	175	179 (1.02)	168 (0.96)	153 (0.87)	162 (0.93)	160 (0.92)	0.94
1966	192	196 (1.02)	184 (0.96)	169 (0.88)	178 (0.93)	176 (0.92)	0.94
1967	203	206 (1.02)	195 (0.96)	179 (0.88)	189 (0.93)	188 (0.93)	0.95
1968	231	229 (0.99)	219 (0.95)	201 (0.87)	218 (0.94)	214 (0.93)	0.96
1969	262	262 (1.00)	253 (0.97)	232 (0.89)	240 (0.91)	238 (0.91)	0.97
1970	300	302 (1.01)	287 (0.96)	270 (0.90)	281 (0.94)	278 (0.93)	0.95
1971	332	337 (1.01)	323 (0.97)	304 (0.92)	306 (0.92)	307 (0.93)	0.96
1972	399	394 (0.99)	377 (0.95)	360 (0.90)	370 (0.93)	368 (0.92)	0.96
1973	556	548 (0.99)	529 (0.95)	500 (0.90)	513 (0.92)	514 (0.92)	0.97
1974	812	823 (1.01)	801 (0.99)	733 (0.90)	774 (0.95)	766 (0.94)	0.97
1975	841	861 (1.02)	825 (0.98)	759 (0.90)	801 (0.95)	786 (0.93)	0.96
1976	951	967 (1.02)	938 (0.99)	872 (0.92)	895 (0.94)	888 (0.93)	0.97
1977	1,080	1,080 (1.00)	1,051 (0.97)	996 (0.92)	1,066 (0.99)	1,008 (0.93)	0.97
1978	1,232	1,187 (0.96)	1,135 (0.92)	1,159 (0.94)	1,139 (0.92)	1,119 (0.91)	0.96
1979	1,557	1,589 (1.02)	1,541 (0.99)	1,466 (0.94)	1,438 (0.92)	1,436 (0.92)	0.97
1980	1,922	1,928 (1.00)	1,890 (0.98)	1,781 (0.93)	1,745 (0.91)	1,777 (0.92)	0.98
1981	1,878	1,909 (1.02)	1,837 (0.98)	1,759 (0.94)	1,738 (0.93)	1,728 (0.92)	0.96
1982	1,734	1,753 (1.01)	1,672 (0.96)	1,620 (0.93)	1,574 (0.91)	1,578 (0.91)	0.95
1983	1,705	1,651 (0.97)	1,592 (0.93)	1,594 (0.94)	1,514 (0.89)	1,575 (0.92)	0.96
1984	1,813	1,875 (1.03)	1,802 (0.99)	1,698 (0.94)	1,637 (0.90)	1,689 (0.93)	0.96
1985	1,848	1,949 (1.05)	1,845 (1.00)	1,727 (0.93)	1,687 (0.91)	1,703 (0.92)	0.95
1986	2,008	2,098 (1.04)	1,987 (0.99)	1,891 (0.94)	1,826 (0.91)	1,863 (0.93)	0.95
1987	2,377	2,455 (1.03)	2,357 (0.99)	2,251 (0.95)	2,169 (0.91)	2,203 (0.93)	0.96
1988	2,697	2,799 (1.04)	2,672 (0.99)	2,557 (0.95)	2,495 (0.93)	2,513 (0.93)	0.95
1989	2,940	3,045 (1.04)	2,909 (0.99)	2,784 (0.95)	2,743 (0.93)	2,748 (0.93)	0.96
1990	3,378	3,471 (1.03)	3,338 (0.99)	3,210 (0.95)	3,158 (0.93)	3,156 (0.93)	0.96
1991	3,391	3,601 (1.06)	3,397 (1.00)	3,300 (0.97)	3,215 (0.95)	3,143 (0.93)	0.94
1992	3,669	3,860 (1.05)	3,610 (0.98)	3,396 (0.93)	3,161 (0.86)	3,165 (0.86)	0.94
1993	3,687	3,797 (1.03)	3,684 (1.00)	3,383 (0.92)	3,480 (0.94)	3,424 (0.93)	0.97
1994	4,192	4,306 (1.03)	4,203 (1.00)	3,824 (0.91)	3,965 (0.95)	3,912 (0.93)	0.98
1995	4,996	5,136 (1.03)	5,020 (1.00)	4,562 (0.91)	4,743 (0.95)	4,703 (0.94)	0.98
1996	5,227	5,476 (1.05)	5,331 (1.02)	4,783 (0.92)	5,040 (0.96)	4,989 (0.95)	0.97
1997	5,478	5,632 (1.03)	5,550 (1.01)	4,957 (0.90)	5,231 (0.96)	5,253 (0.96)	0.99
1998	5,358	5,576 (1.04)	5,459 (1.02)	4,885 (0.91)	5,202 (0.97)	5,178 (0.97)	0.98
1999	5,566	5,791 (1.04)	5,647 (1.01)	5,370 (0.96)	5,395 (0.97)	5,398 (0.97)	0.98
2000	6,326	6,568 (1.04)	6,392 (1.01)	5,993 (0.95)	6,083 (0.96)	6,107 (0.97)	0.97
2001	6,009			5,762 (0.96)	5,868 (0.98)	5,790 (0.96)	0.95
2002	6,280			5,894 (0.94)	5,999 (0.96)	6,002 (0.96)	0.97
2003	7,210			7,030 (0.98)	7,030 (0.98)	6,837 (0.95)	0.93

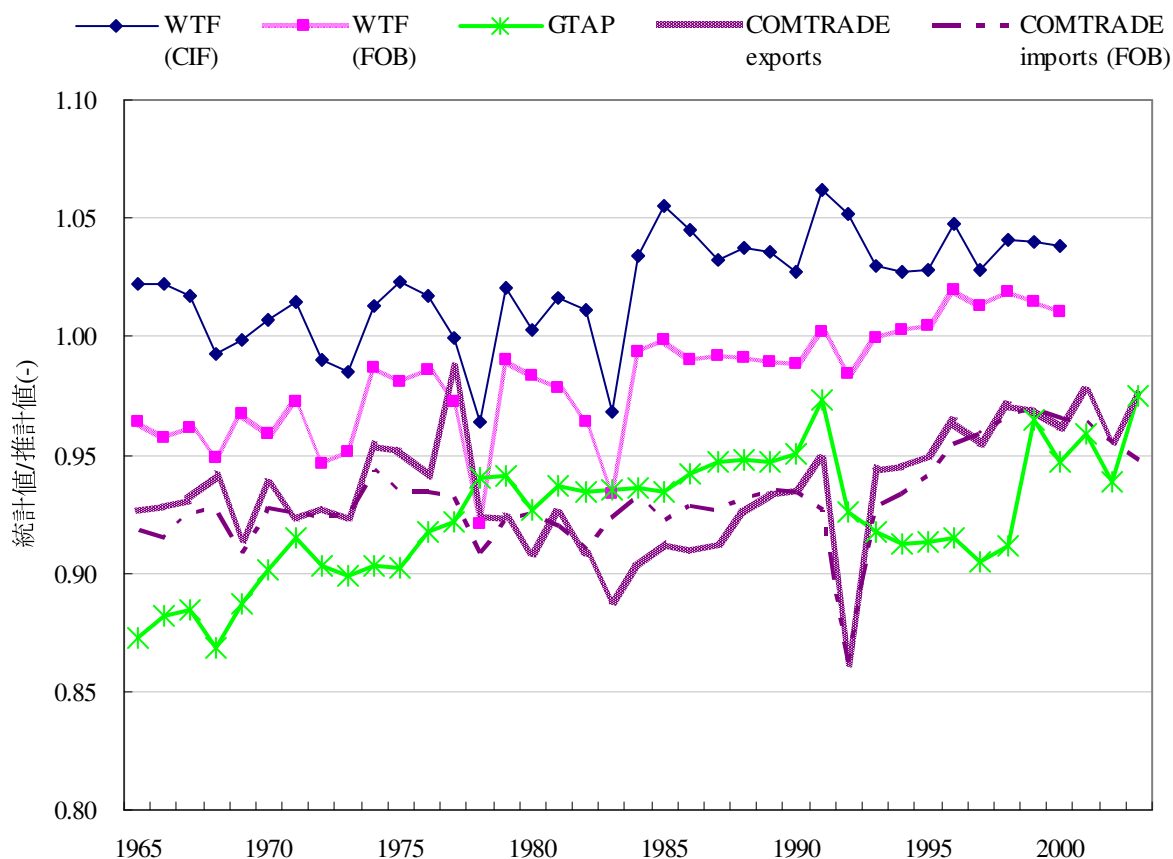


図 4.2 本研究推計値と各統計、データの貿易総額の比較

#### 4.4.2 WTF との比較

次に図 4.2 において WTF との比較で特異的な変化を見せた 1978 年、1983 年について見てみる。COMTRADE、WTF の値と、本研究推計値とを国別で比較する。表 4.3 は上記の年において、推計値と WTF の差が大きかった上位 5 ヶ国における WTF、COMTRADE と本研究推計値の輸出入総額を示している。ただし、WTF、COMTRADE はその他国(Area nes)という国分類があるが、本研究にはその区分がないため比較から除外した。

表 4.3 では COMTRADE では旧ソ連が欠測しているため空白となっている。それ以外の国について見ると、本研究推計値と COMTRADE は比較的近い値となっているが、WTF は小さめの値を示していることがわかる。旧ソ連についても WTF の値は本研究推計値より小さい。これらの国のうち、アメリカやドイツ、韓国は貿易総額が大きいため、WTF の数値との差で見ると大きくなり上位国となっているが、割合で見るとそれほど大きくない。例えば、1978 年のアメリカにおける輸出について見ると、WTF は本研究推計値の 83%、1983 年のドイツについて見ると 96%である。しかし、それ以外の国は割合で見ても大きく異なる。



表 4.3 1978 年、1983 年において WTF と本研究推計値の差が大きかった上位 5 カ国(mil\$)

輸入					輸出			
年	国	推計値	WTF(F.O.B)	COMTRADE	国	推計値	WTF(F.O.B)	COMTRADE
1978	カナダ	39,842	7,438	39,838	アメリカ	141,438	116,948	142,536
	旧ソ連	28,901	16,800		チェコスロバキア	11,558	2,630	11,740
	チェコスロバキア	11,741	2,587	12,042	旧ソ連	21,596	13,856	
	ハンガリー	7,820	3,069	7,612	サウジアラビア	40,733	34,644	40,715
	ナイジェリア	12,192	8,868	12,194	ドイツ	140,543	134,534	142,090
輸入					輸出			
	国	推計値	WTF(F.O.B)	COMTRADE	国	推計値	WTF(F.O.B)	COMTRADE
1983	旧ソ連	43,768	28,276		旧ソ連	141,438	116,948	
	チェコ	14,709	2,368	15,738	サウジアラビア	11,558	2,630	
	ブラジル	16,590	6,346	16,614	チェコ	21,596	13,856	16,477
	韓国	24,531	14,537	25,234	韓国	40,733	34,644	24,437
	サウジアラビア	37,483	29,136	37,513	ドイツ	140,543	134,534	169,290

次に表 4.3 に挙げられた国について本研究推計値、COMTRADE、WTF の値それぞれの経年変化を、図 4.3 から図 4.6 に示す。

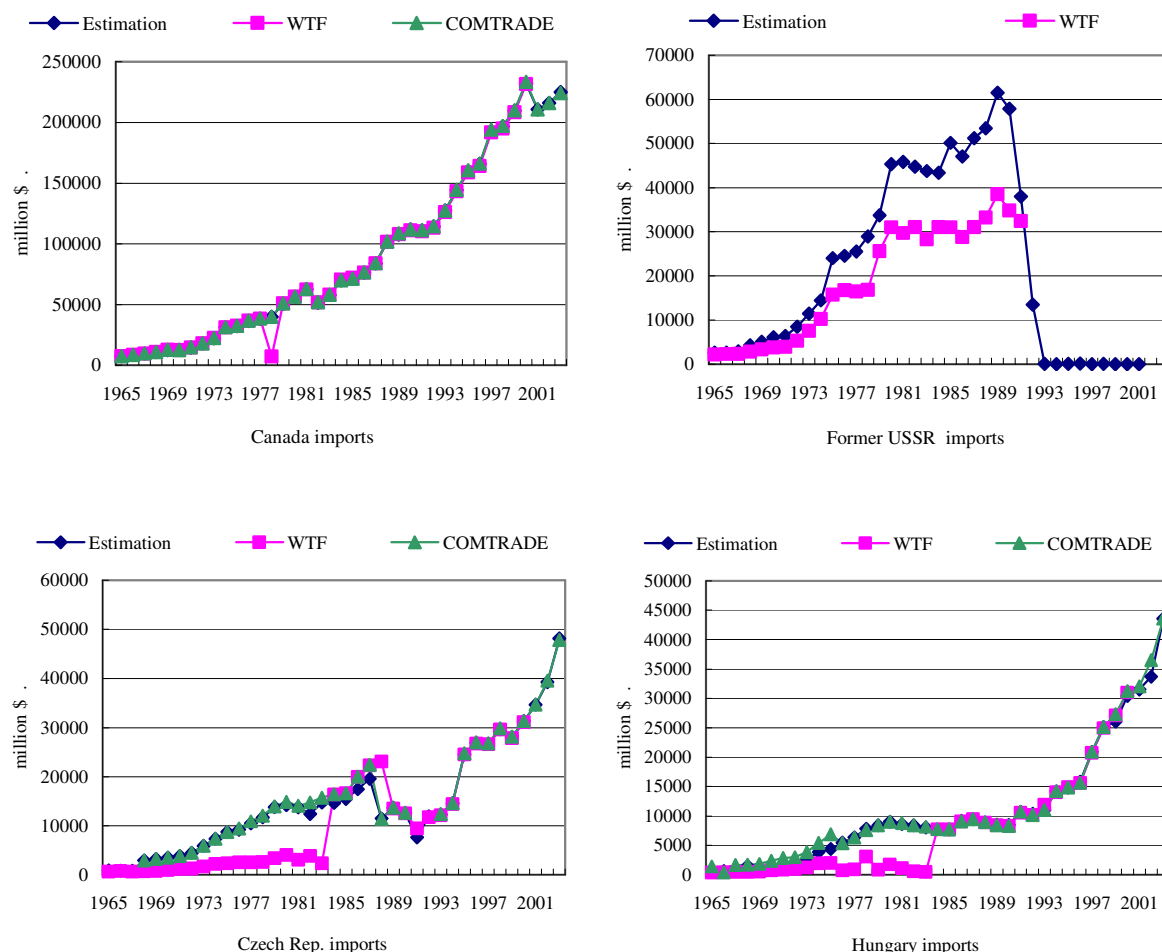


図 4.3 輸入額の比較(a)

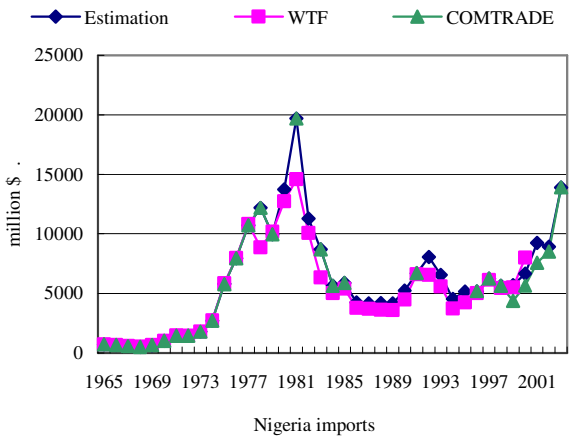
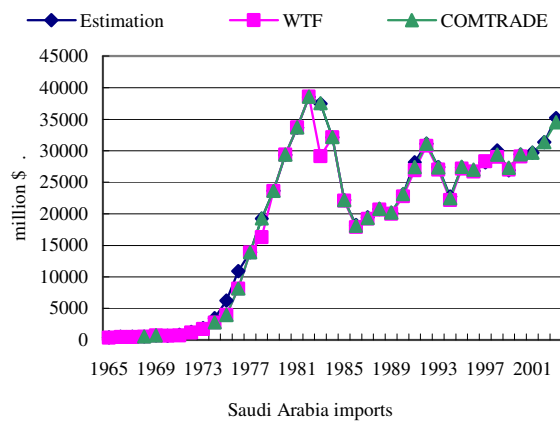
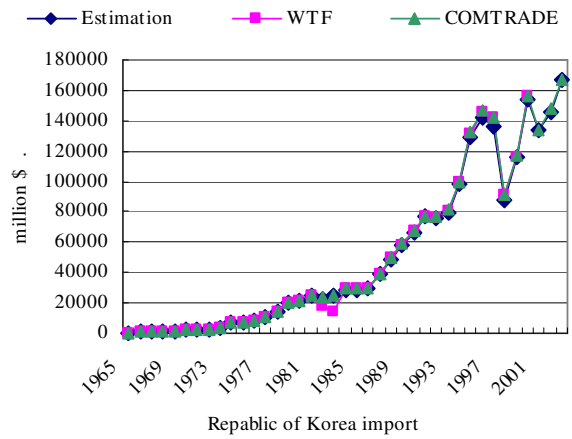
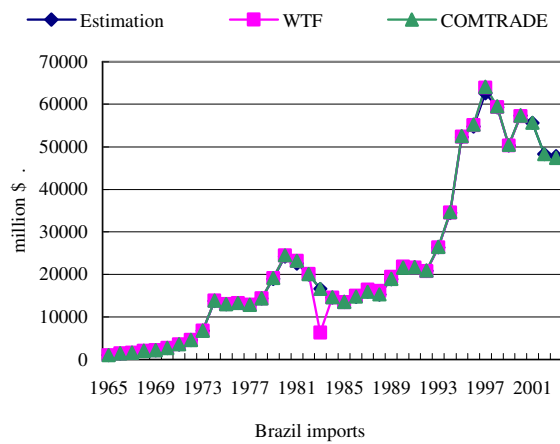


図 4.4 輸入額の比較(b)

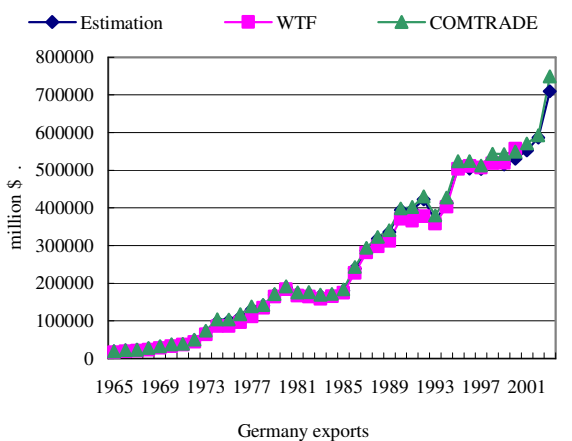
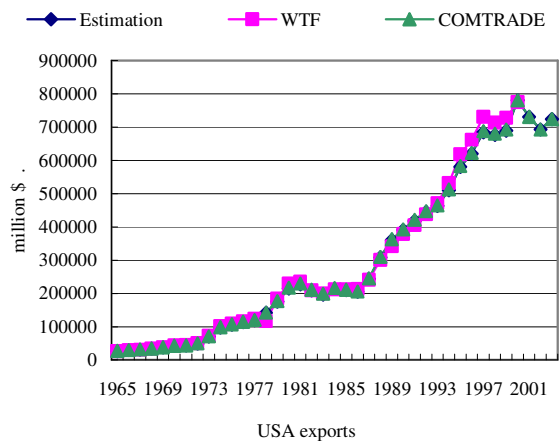


図 4.5 輸出額の比較(a)

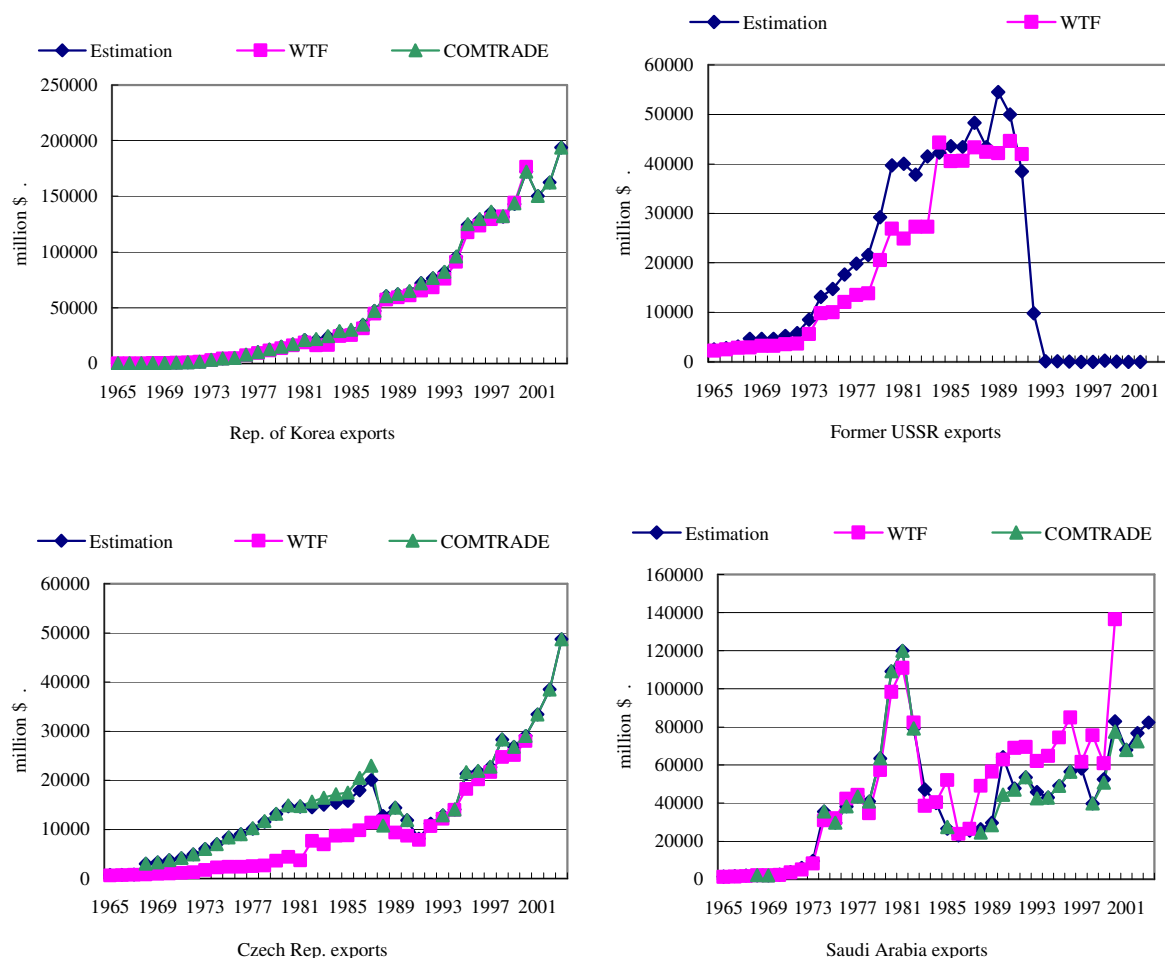


図 4.6 輸出額の比較(b)

まず、カナダの輸入について見ると COMTRADE、本研究推計値は概ね近い値を示しているが、WTF では 1978 年だけ極端に小さくなっている。同様の現象がブラジルの 1983 年における輸入、韓国の 1983 年、1984 年でも起こっている。チェコ、ハンガリーについて見ると、1985 年まで WTF は本研究推計値、COMTRADE より小さな値であったが、それ以降は同じような傾向をしめてしている。旧ソ連は COMTRADE の報告がないため、WTF との比較のみ可能であるが、ほぼ全年にわたって WTF は本研究より小さめの値を示している。サウジアラビア、ナイジェリアについては COMTRADE の報告が部分的に欠測していることがわかる。また、本研究推計値、WTF は比較的 COMTRADE と近い値となっているが、1983 年のみ大きく異なっていることがわかる。

次に輸出についてみる。アメリカ、韓国、ドイツでは本研究、COMTRADE、WTF とともに同じような値を示している。韓国は輸入と同様に 1983 年、1984 年で WTF がやや小さめの値となっている。次に旧ソ連について見ると輸入と同様に COMTRADE の報告はなく、WTF は本研究推計値より小さめの値となっている。チェコについて見ると、本研究と COMTRADE は比較的同じような変遷となっているが、WTF は 1990 年ころまで小さな値で推移している。輸入では WTF と本研究推計値の明らかな乖離が 1985 年までであったのに対して、輸出では 1990 年まで見られる。サウジアラビアでは全体的に本研究推計値や

COMTRADE より大きな値を示している。以上のように WTF では 1983 年において特異的に小さな値を示している国が散見される。また、チェコ、ハンガリー、旧ソ連といった旧共産圏の貿易額が本研究推計値と比べると過小評価されている。つまり、WTF のデータには疑問の余地がある。

#### 4.4.3 COMTRADE との比較

図 4.2 において COMTRADE が特異的な変化を示した 1992 年について見てみる。1992 年は周辺の年と比べると COMTRADE の値が本研究推計値と比べて約 8% 減少している。これは、主として欠測によるものであった。COMTRADE で欠測していて、本研究では推計値のあった国上位 5 ヶ国について、本研究推計値と貿易総額に占める割合を表 4.4 に示す。

表 4.4 1992 年において COMTRADE で欠測していた国と本研究推計値(bil \$)

輸入			輸出		
国	本研究推計値	世界全体の貿易額 に占める割合	国	本研究推計値	世界全体の貿易額 に占める割合
日本	218	6.0%	日本	334	9.1%
台湾	68	1.9%	台湾	83	2.3%
ロシア	32	0.9%	ロシア	36	1.0%
イラン	19	0.5%	南アフリカ	16	0.4%
南アフリカ	17	0.5%	イラン	15	0.4%

輸入、輸出いずれにおいても日本、台湾、ロシア、南アフリカ、イランが上位 5 ヶ国を占めていた。その中でも特に大きな値を示したのが日本であり、輸入、輸出それぞれで世界全体の 6.0%、9.1%を占めていた。COMTRADE の日本の報告は、1992 年のみが欠落している。また、台湾は COMTRADE に報告値がないため、ミラーデータや ITCS によって補間されている。

#### 4.4.4 COMTRADE からの修正量

##### (1) 国別の修正量

ここでは OECD 諸国の修正量について見てみる。修正された量を比較する指標として以下のもの(平均絶対誤差率)を用いた。

$$AME_{r,t}^{exp} = \frac{\sum_i \left( \sum_s Y_{i,r,s,t} - \sum_s \overline{X_{i,r,s,t}^{fob}} \right)}{\sum_i \sum_s \overline{X_{i,r,s,t}^{fob}}} \quad (4.20)$$

$$AME_{s,t}^{imp} = \frac{\sum_i \left( \sum_r Y_{i,r,s,t} - \sum_r \overline{M_{i,r,s,t}^{fob}} \right)}{\sum_i \sum_r \overline{M_{i,r,s,t}^{fob}}} \quad (4.21)$$

$\overline{M_{i,r,s,t}^{fob}}$  :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入報告値(F.O.B)

$\overline{X_{i,r,s,t}^{fob}}$  :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告値(F.O.B)

$Y_{i,r,s,t}$  :  $t$  年における財  $i$ 、国  $r$  から国  $s$  への貿易量における調整値

$AME_{r,t}^{exp}$  :  $t$  年の国  $r$  における輸出報告からの修正量(平均絶対誤差率)

$AME_{r,t}^{imp}$  :  $t$  年の国  $r$  における輸入報告からの修正量(平均絶対誤差率)

この指標について国別で各年の平均値、中央値、標準偏差を表 4.5 に示す。表 4.5 は中央値ごとにソートしたものを示している。

表 4.5 OECD 諸国における国別の COMTRADE からの修正量

国名	輸出				国名	輸入			
	中央値	平均	標準偏差	レコード数		中央値	平均	標準偏差	レコード数
イタリア	0.036	0.036	0.006	39	フランス	0.040	0.042	0.007	39
フィンランド	0.037	0.042	0.016	39	スウェーデン	0.045	0.050	0.018	39
フランス	0.037	0.040	0.008	39	カナダ	0.045	0.048	0.012	39
日本	0.047	0.046	0.009	38	フィンランド	0.047	0.053	0.017	39
スペイン	0.049	0.052	0.019	39	イタリア	0.048	0.050	0.013	39
デンマーク	0.050	0.061	0.028	39	スペイン	0.051	0.052	0.007	39
ポルトガル	0.052	0.055	0.010	39	オーストリア	0.051	0.053	0.012	39
カナダ	0.053	0.055	0.016	39	アメリカ	0.055	0.053	0.008	39
スウェーデン	0.056	0.063	0.024	39	デンマーク	0.055	0.060	0.016	39
ドイツ	0.058	0.061	0.026	39	オーストラリア	0.058	0.058	0.014	39
韓国	0.062	0.071	0.030	39	ポルトガル	0.059	0.061	0.014	39
オーストリア	0.065	0.065	0.022	39	オランダ	0.060	0.096	0.088	39
スイス	0.065	0.066	0.014	39	スイス	0.066	0.070	0.020	39
オランダ	0.069	0.111	0.118	39	ノルウェー	0.067	0.137	0.178	39
ベルギー=ルクセンブルグ	0.070	0.086	0.048	39	日本	0.067	0.069	0.012	38
アイスランド	0.072	0.080	0.034	39	ベルギー=ルクセンブルグ	0.070	0.071	0.015	39
ニュージーランド	0.076	0.071	0.022	39	イギリス	0.071	0.072	0.018	39
イギリス	0.077	0.077	0.017	39	韓国	0.073	0.078	0.022	39
トルコ	0.093	0.103	0.050	39	ニュージーランド	0.074	0.077	0.014	39
ノルウェー	0.095	0.153	0.166	39	ギリシャ	0.079	0.103	0.077	39
アメリカ	0.095	0.092	0.016	39	アイルランド	0.084	0.091	0.026	39
アイルランド	0.113	0.123	0.032	39	アイスランド	0.100	0.129	0.100	39
オーストラリア	0.114	0.109	0.031	39	ドイツ	0.102	0.095	0.038	39
ギリシャ	0.118	0.124	0.051	39	メキシコ	0.105	0.156	0.138	39
ポーランド	0.120	0.584	0.953	24	トルコ	0.116	0.118	0.030	39
メキシコ	0.127	0.192	0.158	39	チェコ	0.169	0.208	0.154	34
チェコ	0.170	0.236	0.203	34	ポーランド	0.181	0.645	0.907	24
ハンガリー	0.261	0.660	0.748	39	ハンガリー	0.322	0.567	0.531	39
世界トータル	0.199	0.203	0.025	39	世界トータル	0.186	0.187	0.027	39

OECD 諸国の中でもイタリア、フランス、フィンランドなどでは輸出入ともに修正量が少なかった。これらの3カ国における修正量は輸出で 0.036、0.037、0.037、輸入で 0.048、0.040、0.047 であり、5%以内の修正量である(いずれも中央値)。日本は輸出では 0.047 と比較的修正量は小さかったが、輸入では 0.067 とやや大きな値を示した。修正量が大きかったのは、東欧諸国のハンガリー、チェコ、ポーランドなどであった。西欧、北米諸国の大半の国と日本では修正量は中央値、平均ともに 0.1 以下であり、世界全体の中央値 0.199(輸出)、0.204(輸入)、平均 0.186(輸出)、0.187(輸入)と比べると小さいことがわかる。このことから、貿易総額で見ると OECD 諸国の中でも西欧、アメリカなどの先進国では比較的修正が少なかったといえる。一方、下位に位置するハンガリー、ポーランドについて見ると、中央値ではそこまで大きな値を示していないが、平均や標準偏差で大きな値を示しており、ハンガリーでは輸入の平均が 0.660、輸出の平均が 0.567 となった。

## (2) 財別の修正量

前項と同じような指標を使って財ごとの修正量を評価する。以下の指標を用いる。

$$AMEI_{i,t}^{exp} = \frac{\sum_r \left( \sum_s Y_{i,r,s,t} - \sum_s \overline{X_{i,r,s,t}^{job}} \right)}{\sum_r \sum_s \overline{X_{i,r,s,t}^{job}}} \quad (4.22)$$

$$AMEI_{i,t}^{imp} = \frac{\sum_s \left( \sum_r Y_{i,r,s,t} - \sum_r \overline{M_{i,r,s,t}^{job}} \right)}{\sum_s \sum_r \overline{M_{i,r,s,t}^{job}}} \quad (4.23)$$

$AMEI_{i,t}^{exp}$  :  $t$  年の財  $i$  における輸出報告からの修正量(指標)

$AMEI_{i,t}^{imp}$  :  $t$  年の財  $i$  における輸入報告からの修正量(指標)

SITC rev1(1965-1985)と SITC rev2(1986-2003)それぞれの SITC 1 桁の修正量を示す。表 4.6 は、それぞれ輸入、輸出について平均と中央値を示したものである。また、図 4.7 に中央値を示す。左側が SITC rev1、右側が rev2 を表す。

まず、rev1,2 とともに特徴的なのがその他財である 9 の値が突出して高いことである。これは、財区分 93 が含まれており、4.3.4 項で示したように特別が扱いをしたため、大規模に修正されたと考えられる。SITC rev1 について見ると”3”の燃料等の資源が輸出では 0.45 と大きな値となっているのに対して輸入では 0.086 となり大きな差が見られる。それ以外の財では、輸出入は同じような傾向を示していて 0.1 から 0.2 の範囲内にある。SITC rev2 について見ると SITC rev1 とやや異なる傾向を示した。”3”の燃料等の資源については SITC rev1 と同様に輸出の修正量が大きく、0.353 であった。”4”の油脂についても輸出入で差が見られ、輸出よりも輸入の修正量が大きくなった。

表 4.6 SITC1 桁の財ごとの COMTRADE からの修正量

SITC 1桁分類	輸出				輸入			
	SITC rev1		SITC rev2		SITC rev1		SITC rev2	
	中央値	平均値	中央値	平均値	中央値	平均値	中央値	平均値
0 食料品及び動物	0.138	0.154	0.061	0.115	0.168	0.171	0.038	0.123
1 飲料およびたばこ	0.130	0.132	0.197	0.128	0.169	0.181	0.216	0.154
2 食用に適しない原材料（鉱物性燃料を除く）	0.172	0.186	0.042	0.138	0.138	0.140	0.030	0.101
3 鉱物性燃料、潤滑油その他これらに類するもの	0.441	0.459	0.163	0.353	0.074	0.092	0.078	0.152
4 動物性または植物性の加工油脂およびろう	0.152	0.160	0.138	0.099	0.203	0.215	0.154	0.254
5 化学工業生産品	0.115	0.122	0.041	0.093	0.150	0.162	0.052	0.094
6 原料別製品	0.121	0.127	0.035	0.131	0.147	0.151	0.029	0.088
7 機械類および輸送用機器類	0.072	0.070	0.007	0.115	0.157	0.163	0.043	0.092
8 雑製品	0.123	0.121	0.035	0.267	0.112	0.119	0.044	0.080
9 特殊取扱品	1.976	1.805	1.530	1.908	6.117	7.850	10.709	2.015

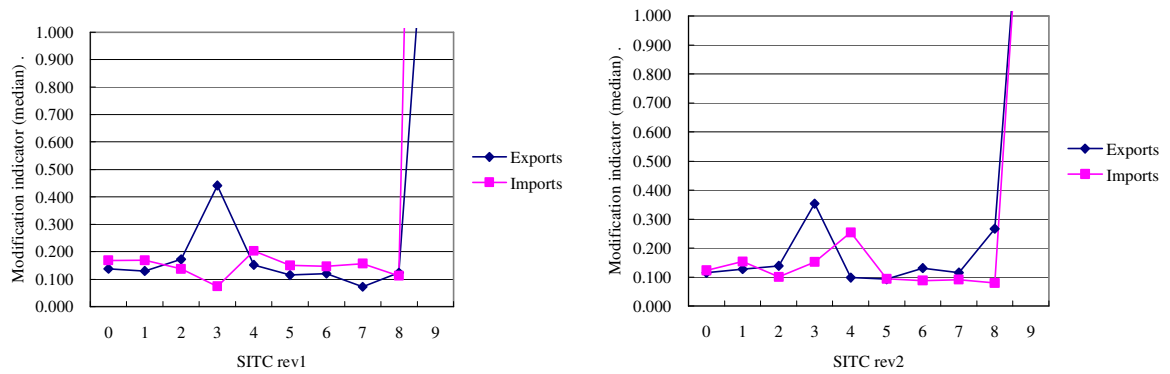


図 4.7 SITC1 桁における財別の修正量中央値比較

#### 4.5 おわりに

本研究では、世界全域におけるバイラテラルな貿易データを補間・修正する手法を開発した。一般に貿易データはその信頼性が疑問視されており、本研究ではより信頼できる貿易データの作成を試みた。本研究の手法の特徴を挙げると、数理手法を用いて多くの報告値を一度に扱う方程式体系を記述したことにある。その結果、従来の研究と比べて欠損の補完や調整を体系的に行えるようになった。推計値と貿易統計を OECD 諸国について比較すると、北米、西欧圏の国の修正量は小さい傾向にあったが、東欧圏の国の修正量は大きい傾向にあった。財別で見た場合、燃料等の資源の修正量が大きかった。

#### 参考文献

- [1] Dimaranan, V. D.(2006): Global Trade, Assistance, and Production The GTAP 6 Data Base, Center for Global Trade Analysis, Purdue University.
- [2] FAO (2005): The World's agricultural trade matrix, Food and Agriculture Organization of United States.
- [3] Feenstra, R. C., R. E. Lipsey, H. Deng, Alyson, C. Ma, and H. Mo (2005): World Trade Flows:1962-2000, NBER Working paper series No.11040, National Bureau of Economic Research,
- [4] Gehlhar, M.J. (1996): Reconciling Bilateral Trade Data for Use in GTAP, GTAP Technical Paper No.10, Center for Global Trade Analysis, Purdue University.
- [5] Kainuma, M., Y. Matsuoka, and T. Morita (2002): Climate Policy Assessment: Asia-Pacific Integrated Modeling, Springer, Tokyo.
- [6] Kinoshita, S. and Y. Noda (1995): World Trade Data System: Arrangement and its application, I.D.E. Statistical Series No.67, Institute of Developing Economies , Tokyo.
- [7] OECD(Organization for Economic Co-operation and Development)(2005): International Trade by Commodity statistics, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris、France.
- [8] Yeats, A. J. (1995): Are Partner-Country Statistics Useful for Estimating “Missing” Trade Data?, Policy Research Working Paper 1501, The World Bank, International Economics

Department, International Trade Division.

- [9] UNCTAD(United Nations Conference on Trade and Development) (ホームページ):  
<http://wits.worldbank.org/witsweb/>.
- [10] UN(United Nations)(2006): United Nations Commodity Trade Statistics Database, United Nations, New York, USA.



## 付録 A 計算に用いた変数と集合の一覧

### (1) 文字式一覧

#### ・ 未知変数

$Y_{i,r,s,t}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易量における推計値

$\varepsilon_{f,i,r,s,t}^M$ : 貿易統計種  $f$ 、 $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入報告と調整値の乖離率

$\varepsilon_{f,i,r,s,t}^X$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告と調整値の乖離率

#### ・ 既知変数

##### 統計値

$\overline{M_{i,r,s,t}^{cif}}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入報告値(C.I.F)

$\overline{X_{i,r,s,t}^{fob}}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告値(F.O.B)

統計値から計算する変数

$\overline{\gamma_{i,t}}$ :  $t$  年における財  $i$  の輸入報告値 C.I.F から F.O.B への換算係数(一度目の計算)

$\overline{RIM_{i,s,t}}$ :  $t$  年における財  $i$ 、国  $s$  の輸入報告の信頼値

$\overline{REX_{i,r,t}}$ :  $t$  年における財  $i$ 、国  $r$  の輸出報告の信頼値

$\overline{M_{i,r,s,t}^{fob}}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入報告値(F.O.B)

$\overline{AL_{i,r,s,t}}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告と輸入報告の一致度

$\overline{MR_{i,s,t}^T}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $s$  の輸入量総量

$\overline{MR_{i,s,t}^A}$ :  $t$  年における財  $i$  の国  $s$  の輸入報告のうち、ミラーデータとの一致度が高い報告の総量

設定変数

$\overline{\alpha}$ : 信頼値の許容値(本研究では 0.67 とした)

$\overline{w_{f,i,r,s,t}^M}$ : 貿易統計種  $f$ 、 $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸入報告の乖離率に対する重み

$\overline{w_{f,i,r,s,t}^X}$ : 貿易統計種  $f$ 、 $t$  年における財  $i$  の国  $r$  から国  $s$  への貿易の輸出報告の乖離率に対する

る重み

## (2) 集合一覧

$i \in I$ : 財全体

$f \in F$ : 統計種の集合

$r \in R$   $s \in S$ : 国の集合

$t \in T$ : 年の集合

$i \in I_0$ : 全財の集合

$i \in I_1$ : SITC の 1 桁の財分類の集合

$i \in I_{all}$ : 集合  $I_0 + I_1$  をあわせたもの

$i \in I_{lower}^{I_{upper}}$ : ある SITC 上位桁  $I_{upper}$  に対応する SITC 下位桁  $I_{lower}$  の集合

$i \in I_2$ : SITC2 桁の財の集合

$i \in I_3$ : SITC3 桁の財の集合

$i \in I_4$ : SITC4 桁の財の集合

## 第5章 貨幣勘定の構築とそれを用いたエネルギー消費量、二酸化炭素排出量の推計

本章では各種統計値に合致する貨幣勘定表、エネルギーIO表を推計、調整する構築手法を提案する。そして、その手法を実際に適用し化石燃料由来のエネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量を推計する。推計は1年ずつ行う。推計作業は、各地域別の推計作業と世界全体の貿易収支をとる推計作業の2種類に分類でき、それらを交互に繰り返し用いる。両推計作業ともに Cross-entropy 法を用いて定式化する。

本研究の推計値と既存の統計値を比較すると、世界全体のエネルギー消費量、あるいはエネルギー消費量の大きな国の国内エネルギー消費量は近い値を示した。一方、一部の特定の国では既存の統計値と本研究の値は大きく異なる値を示した。既存の統計値からエネルギー消費量が修正された主たる要因は、本研究において複数のエネルギー統計を用いたこと、経済情報によるエネルギーフローの補完・修正を行ったことであった。また、エネルギー財の価格を既存の統計と比較すると世界の平均から異常に離れているような価格が修正された。

### 5.1 はじめに

2007年に公表された IPCC(2007)では、産業革命以来地球の平均気温が上昇していること、その気温上昇は人間活動が排出する温室効果ガスに由来している可能性が非常に高い、ということが示された。また、併せて気候変動に伴う各種被害、例えば、海面上昇による居住地の喪失、偏差の激しい気象現象に伴う災害、作物生産性への影響、生態系への影響などが指摘された。気候変動問題に対しては大別して緩和策と適用策の2種類がある。このうち、緩和策に取り組むにあたっては、今後の世界全体、あるいは各国における温室効果ガスの排出量の見通し、その削減可能性、削減コスト等の定量的な評価が政策決定を行う上で重要な役割を担う。

これまで多くの研究グループは統合評価モデルやエネルギー需給に関するモデルを用いて、上記の課題に対して定量的な評価を行ってきた(Fujino *et al.*, 2006, Rao and Riahi, 2006, Smith and Wigley, 2006 など)。そのうち多部門の応用一般均衡モデルを用いたモデリングは貨幣フローやエネルギーフローの記述が包括的にでき、社会経済全体の整合性を持った推計が可能である。そのため、部門横断的な緩和対策費用の算定にも用いられている(Barker *et al.*, 2007)。その反面、社会会計表、エネルギーバランス表などの詳細なデータを必要とする。そのような世界をカバーする社会会計表、エネルギーバランス表に相当するデータの作成にあたってはこれまで GTAP(Dimaranan, 2006)が大きく貢献してきた。

しかし、経済統計やエネルギー統計にはいくつか問題があることがわかってきた。例えば、(i)複数の統計を比較したときに、同じ国の同じ項目に対して異なる報告がなされていること、(ii)貿易統計とエネルギー統計からエネルギー価格を計算すると世界平均と比較して異常に離れている国が見られること、(iii)エネルギー統計は欠測を多く抱えていることなどである。こういったデータの問題は、モデルの推計値の信頼性を損なうため、何らかの修正、あるいは調整が必要となる。

以上のような背景を受け、本研究は、様々な統計情報を集め、それらを調整・融合することにより、いくつかの尺度で見て、既存の統計と比べて信頼度の高い経済・エネルギー

データを作成した。本研究では、貨幣勘定体系とエネルギー勘定体系を構築し、それに従い貨幣フローとエネルギーフローを推計する。

本章では、まず勘定体系、その推計手法を示した後に、推計されたデータについて示し、前述の統計の問題がどのように解決されたかということを示す。

## 5.2 貨幣・エネルギー勘定表

### 5.2.1 勘定表の枠組み

本研究では貨幣勘定表、エネルギーIO表を構築する。本節ではその枠組などの定義を示す。

#### (1) 貨幣勘定

貨幣勘定の枠組みを表 5.1 に示す。この表は、ある一国における貨幣フローを記述するものであり、列項目から行項目へ貨幣のフローがあるときに値が記述される。基本的にはSNA93(United Nations, 2003)の概念を基に作成した。行列項目は同一であり、財・サービス、生産活動、生産要素、地域家計、民間家計、政府、資本、輸入税、輸出税、間接税、生産税、直接税、輸入マージン、国外で構成される。財・サービスは、市場で取引される財、サービスを表し、生産活動はその財を産出する生産活動部門を表す。本研究では1つの生産活動は1つの財を産出すると仮定する。地域家計は民間家計、政府、資本の収入を一度すべて集め、それを消費に分配する仮想的な部門である。輸出税、輸入関税、生産税、間接税、直接税のうち、各財、活動に対する補助金はマイナス計上する。生産要素は、労働、資本、土地の3つに分類される。輸入マージンは輸入財にかかる貿易運賃、保険料を意味する。本勘定表では、すべての行項目、それに対応する列項目で収支が成り立ち、行計と列計は等しい。

表 5.1 貨幣勘定表の枠組み

	財・サービス			生産活動			生産要素			地域家計	民間家計	政府	資本	輸入関税	輸出税	間接税	生産税	間接税	国外	TOTAL
	財・サービス1	財・サービス2	財・サービス3	生産活動1	生産活動2	生産活動3	労働	資本	土地											
財・サービス	財・サービス1			中間投入	中間投入	中間投入					家計消費	政府消費	資本形成						輸出	
	財・サービス2			中間投入	中間投入	中間投入					家計消費	政府消費	資本形成						輸出	
	財・サービス3			中間投入	中間投入	中間投入					家計消費	政府消費	資本形成						輸出	
生産活動	生産活動1	産出																		
	生産活動2		産出																	
	生産活動3			産出																
生産要素	労働			労働投入	労働投入	労働投入														
	資本			資本投入	資本投入	資本投入														
	土地			土地投入	土地投入	土地投入														
地域家計							賃金	資本投資	その他					輸入関税	輸出税	間接税	生産税	所得税		
民間家計										国民所得										
政府										政府収入										
資本								資本減耗		貯蓄									貿易収支	
輸入関税	輸入関税	輸入関税	輸入関税																	
輸出税	輸出税	輸出税	輸出税																	
間接税				間接税	間接税	間接税					間接税	間接税	間接税							
生産税				生産税	生産税	生産税														
直接税							直接税	直接税	直接税											
輸入マージン	輸入マージン	輸入マージン	輸入マージン																	
国外	輸入	輸入	輸入																	
TOTAL																				

#### (2) エネルギー勘定

エネルギー勘定の概観を表 5.2 に示す。貨幣勘定表と似たような構造であるが、税や生産要素投入などエネルギーフローを伴わないセルは本表から省かれている。また、財・サ

ービスはエネルギー財(石炭、原油、天然ガス、石油精製品、発電(再生可能エネルギーを含む))の 5 種類のみを扱った。生産活動の区分は貨幣勘定と同一のものを用いる。貨幣フローとは逆で、行項目から列項目へエネルギーフローが存在したときに数値が記述される。

表 5.2 エネルギー勘定表

		財			生産活動			民間家計	政府	国外	Total
		エネルギー財1	エネルギー財2	エネルギー財3	生産活動1	生産活動2	生産活動3				
財	エネルギー財1				中間投入	中間投入	中間投入	家計消費	政府消費	輸出	
	エネルギー財2				中間投入	中間投入	中間投入	家計消費	政府消費	輸出	
	エネルギー財3				中間投入	中間投入	中間投入	家計消費	政府消費	輸出	
生産活動	生産活動1	産出									
	生産活動2		産出								
	生産活動3			産出							
国外		輸入	輸入	輸入							
Total											

### 5.2.2 産物・部門の分類

本勘定表では、表 5.3 に示されるような 46 の生産活動、民間家計、政府、資本形成、国外という主体と 46 の財サービスを扱う。生産活動と財・サービスは一対一で対応している。Standard Industrial Classification)の revision3 の分類と中央生産物分類 CPC(Central Products Classification)を用いて表される。

表 5.3 産業分類、財分類

Code	説明	ISIC rev3 code	CPC code
PDR	米		0113, 0114
WHT	小麦		111
GRO	その他穀類		011, 0115, 0116, 0119
V_F	野菜・果物・木の实		012, 013
OSD	油糧作物		014
C_B	砂糖作物		018
PFB	繊維作物		0192
OCR	その他作物		015, 016, 017, 0191, 0193, 0194, 0199
CTL	牛		0211, 0299
OAP	その他畜産		0212, 0292, 0293, 0294, 0295, 0296, 0297, 0298
RMK	生乳		0291
WOL	羊毛		0296
FRS	林業		03
FSH	漁業	015, 05	
COA	石炭	101, 102	
OIL	原油	111, 112 (related to oil extraction), 103	
GAS	天然ガス	111, 112 (related to gas extraction)	
OMN	非化石燃料鉱業	12, 13, 14	
OMT	精肉		2111, 2112, 2113, 2114, 2161, 2162
VOL	食用油		2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 217, 218
MIL	酪農製品		22
SGR	砂糖		235
OFD	その他加工食料		212, 213, 214, 215, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 232, 233, 234, 236, 237, 239
B_T	飲料・タバコ		24, 25
TEX	衣料・繊維製品	17, 18, 19, 243	
LUM	材木	20	
PPP	紙・パルプ	21, 2211, 2212, 2213, 2219, 222, 223	
CRP	化学・プラスチック・ゴム	241, 242, 25	
P_C	石油精製	231, 232, 233	
NMM	非金属	26	
I_S	鉄鋼	271, 2731	
NFM	非鉄金属	272, 2732	
FMP	金属製品	28	
OME	機械	29, 31, 33	
ELE	電子製品	30, 32	
MVH	自動車	34	
OTN	その他輸送機器	35	
OMF	その他製造業	36, 37	
ELY	電気	401	
GDT	ガス供給	402, 403	
WTR	水道	41	
CNS	建設	45	
TRD	貿易・小売	50, 51, 52, 55	
TRS	交通・通信	60, 61, 62, 63, 64	
FIR	金融・保険	65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74, dwellings	
CSS	その他サービス	75, 80, 85, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 99	

### 5.2.3 対象

前節で示した手法の適用について述べる。まず、適用したのは 153 の国と地域、対象年は 1980 年から 2000 年である。

### 5.3 推計方法

#### 5.3.1 使用する統計情報とその問題・推計の方針

社会会計表、エネルギーIO 表を推計するのに使える情報は、大別して 3 つある(一覧は表 5.4 に示す)。

- (1) 社会会計表
- (2) 産業連関表、生産額、付加価値額、輸出入額など社会会計表の一部を表す情報
- (3) エネルギーフローに関する情報

このうち、(1)の社会会計表を全世界で得られるのは GTAP(Dimaranan, 2006)が唯一である。ただし、GTAP は単年を対象としたデータである。一方、今回推計しようとしている社会会計表は過去数十年程度に及ぶ。従って、今回推計しようとしている社会会計表の大部分のデータは欠測していることになる。そこで、GTAP を用いて欠測を補完し、(2)や(3)の統計情報が得られる場合はそれに推計値が近くなるようにする。また、(2)、(3)の統計情報にも誤差や不一致が含まれる。従って、それらの調整も同時に行うような方法が必要となる。さらに、経年変化で異常な値を示さないよう工夫も必要となる。

#### 5.3.2 推計の概要

貨幣、エネルギー勘定表の推計手法の概要を図 5.1 に示す。図 5.1 には 2000 年、1999 年の推計の概要が記述されている。

貨幣勘定表、エネルギー勘定表の計算に関して以下に示す。まず、図 5.1 の一番左上の各種統計情報を入力し、1 回目の地域内調整計算を行う(地域内調整計算については次項以降で詳しく説明する)。地域内調整計算では、各国地域別に貨幣勘定表とエネルギー勘定表が計算される。そうして、得られた各国の貨幣勘定表とエネルギー勘定表における輸出、輸入の項は、世界全体の輸出入が等しくなるという貿易収支を満たしていないので、輸出入額の総額、輸出入量の総量の収支が合うように貿易収支計算で調整する。貿易収支計算が終わったら、その結果を用いて、再び各国の地域内調整計算を行う。次に、もう一度貿易収支計算を行う。2 度目の貿易収支計算の輸出入額、輸出入量を最後の地域内調整計算に入力して、各国の貨幣勘定表とエネルギー勘定表に記述される値を決定する。このときは輸出入額、輸出入量は固定値として扱う。そうして推計された各国の勘定表は、次の年の推計に用いられる。一連の調整作業は各年別に行う。計算は 2000 年をスタート年とし、次に 1999 年、1998 年というように順番にさかのぼっていった。推計された勘定表を次の年の基準マトリクスとして推計に使うことで、経年変化で異常な値とならないように工夫した。

前述のように本手法では各年に対して 2 回の貿易収支計算と 3 回の地域内調整計算を行った。この繰り返し計算の回数を 3 回としたのは、実際に試行的に計算を行った結果、3 回目の地域内調整計算で計算を打ち切るのに妥当であろうと判断できたためである。具体的には、2 回目の地域内調整計算が終わった段階で、各財・サービスの世界全体の輸出入総額の不一致を調べたところ、最大の不一致が見られた財・サービスでもその不一致は 20% 以内であったためである。

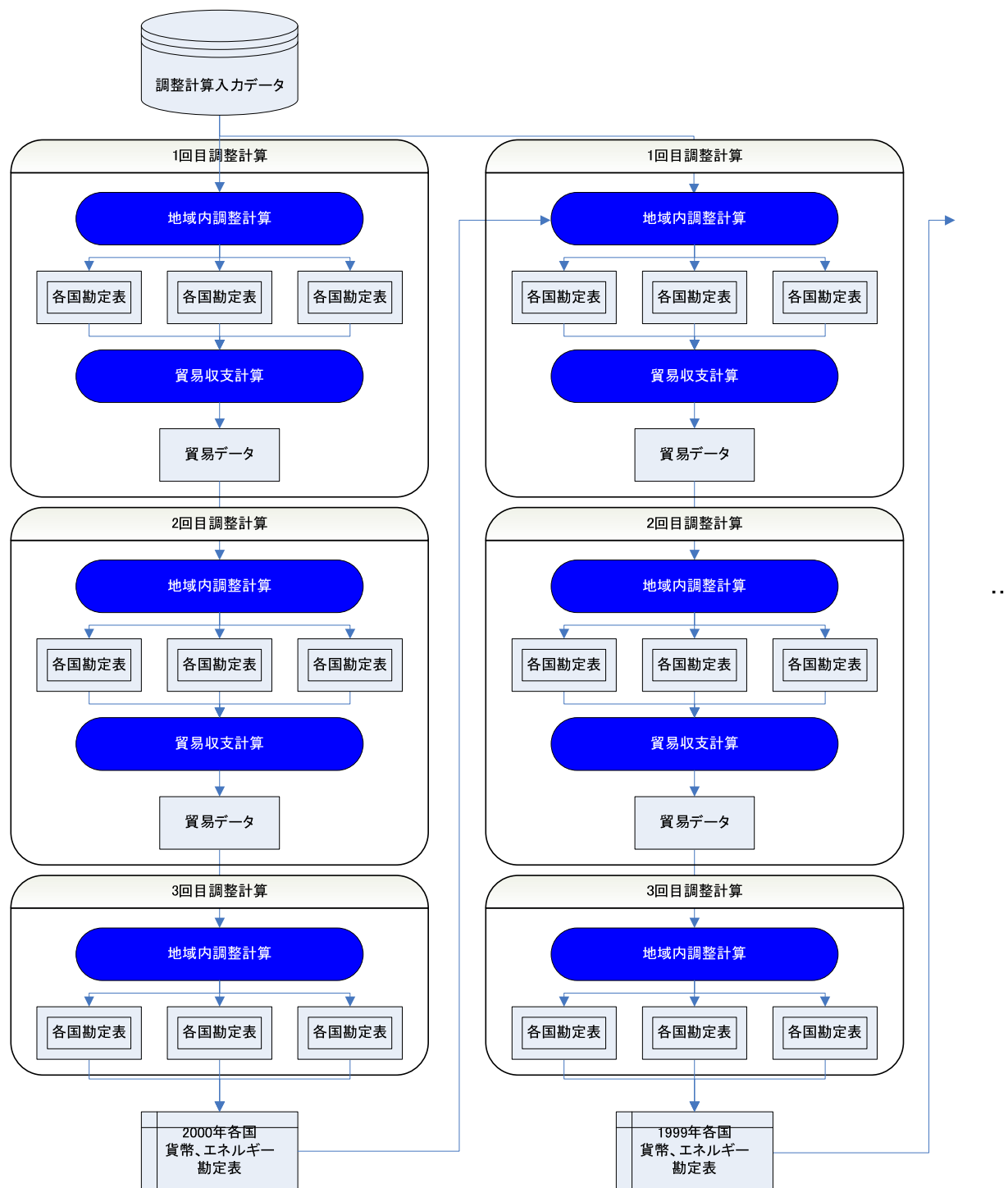


図 5.1 推計手法概要図

### 5.3.3 貨幣勘定表・エネルギーIO表の調整

本項では、地域内調整計算の具体的な方法について示す。地域内調整計算は Cross-entropy 法を用いる。まず、基準となる貨幣勘定表(以降基準マトリクスと呼ぶ)を設定し、その基準マトリクスを用いて、貨幣とエネルギーのフローを同時に推計する。

調整計算において最小化する目的関数は以下の 3 種類の事項を含む。[1] 基準マトリクスとの乖離、[2] 貨幣、エネルギーフローに関する各種統計情報(例えば生産額、輸出入量など)からの乖離、[3] それぞれの国内におけるエネルギー財の消費価格、生産価格、輸出



入価格の乖離、である。

以下では、まず(1)、(2)、貨幣フローのみの推計をするときの定式群を示し、次に(3)、(4) エネルギーフローを追加したときの定式群を示す。推計に用いる文字式と集合の一覧は付録に示す。

### (1) 貨幣フローの定式化

基準マトリクス  $\overline{\xi_{i,j}}$  を用いて貨幣勘定表  $x_{i,j}$  を推計するとする。基準マトリクスにおける列和を  $\overline{\psi_j}$  として、基準マトリクスに対して  $\overline{\theta_{i,j}}$  を以下のように定義する。

$$\overline{\theta_{i,j}} = \frac{\overline{\xi_{i,j}}}{\overline{\psi_j}}, \quad i \in I, j \in J \quad (5.1)$$

$\overline{\theta_{i,j}}$  は列和に対する各要素  $i$  の割合である。

次に、推計される  $x_{i,j}$  ついても同様に  $q_{i,j}$  を定義する。

$$q_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\sum_{i \in I} x_{i,j}}, \quad i \in I, j \in J \quad (5.2)$$

財・サービス、産業活動、民間家計、政府、資本、地域家計、各種税金の需給バランスが成り立つため、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_i = \sum_{j \in J} x_{i,j} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{y}^t = \mathbf{y}_j = \sum_{i \in I} x_{i,j} \quad (5.4)$$

次に、推計値  $x_{i,j}$  のうち、ある  $i, j$  についてある統計  $s$  の情報  $\overline{d_{1s}^{(k_l)}}$  が得られたとする。ここで、 $k_l$  は統計情報の種類を意味し、年、統計種、財・サービス区分、産業活動区分、生産や輸出入などのフローの種類の区分の要素を持つ。例えば、情報  $\overline{d_{1s}^{(k_l)}}$  の例として産業別の生産額、付加価値額が挙げられる。推計値  $x_{i,j}$  と統計情報  $\overline{d_{1s}^{(k_l)}}$  の関係は、誤差割合  $e_{1s}^{(kl)}$  を用いて以下のように表される。

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \overline{g_{1i,j}^{(k_l)}} \cdot x_{i,j} = \overline{d_{1s}^{(k_l)}} \cdot e_{1s}^{(k_l)} \quad k_l \in K_1, \quad s \in S \quad (5.5)$$

ここで、 $\overline{g_{1i,j}^{(k_l)}}$  は 0 と 1 を持つ設定変数である。その情報種  $k_l$  に対応する  $i, j$  には 1、それ以外にはゼロが入っている。例えば、情報  $\overline{d_{1s}^{(k_l)}}$  が家計消費の総額だった場合、 $\overline{g_{1i,j}^{(k_l)}}$  には民間家計の列すべてに 1 が入り、それ以外にゼロが入っている。次に統計情報の誤差の割

合  $e_{1s}^{(k_1)}$  を以下のように表す。

$$\ln e_{1s}^{(k_1)} = w_{1s}^{(k_1)} \cdot \overline{v_{1s}^{(k_1)}} - (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \cdot \overline{v_{1s}^{(k_1)}} \quad k_1 \in K_1, \quad s \in S \quad (5.6)$$

$w_{1s}^{(k_1)}$  は未知変数で、0 から 1 までの値をとる。 $\overline{v_{1s}^{(k_1)}}$  は誤差  $e_{1s}^{(k_1)}$  の値の範囲となる。

Cross-entropy 法(Golan *et al.*, 1996)を用いて目的関数を以下のように設定する。目的関数の第一項は、基準マトリクスとの乖離、第二項は統計情報との乖離を表す。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\theta_{i,j}} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \overline{\gamma_{1s}^{(k_1)}} \cdot \left[ w_{1s}^{(k_1)} \ln w_{1s}^{(k_1)} + (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \ln (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \right] \end{aligned} \quad (5.7)$$

ここで、 $\overline{\gamma_{1s}^{(k_1)}}$  は重みを表す設定変数である。

## (2) 制約式の追加

ここまでの式体系は、社会会計表の列和に対する各要素の割合が保存し、かつ統計情報が得られた場合はそれと推計値が近くなるという仮定で成り立っている。上記の条件以外にも社会会計表内の変数で一定の関係を持つと仮定できる条件がある。そこでそれらについて定式化する。

### 1) GDP に対するマクロ経済指標の割合

まず、推計の対象となる地域の GDP を  $GDP$  とし、GDP の生産側の要素、賃金、資本減耗、土地、税金、補助金の集合を  $J_{go}$  とすると、GDP は以下のように表される。

$$GDP = \sum_{j \in J_{go}} y_j \quad (5.8)$$

同様に GDP の消費側の要素である家計消費、政府消費、資本形成、輸出、輸入を  $J_{ge}$  とすると以下のように表される。

$$GDP = \sum_{j \in J_{ge}} y_j \quad (5.9)$$

GDP に対する生産要素の割合を  $qg_j^{go}$  とすると、生産要素の割合は以下のように表される。

$$qg_j^{go} = \frac{y_j}{GDP} = \frac{y_j}{\sum_{j \in J_{go}} y_j} \quad j \in J_{go} \quad (5.10)$$

同様に GDP に対する消費の割合を  $qg_j^{ge}$  とすると以下のように表される。

$$qg_j^{ge} = \frac{y_j}{GDP} = \frac{y_j}{\sum_{j \in J_{ge}} y_j} \quad j \in J_{ge} \quad (5.11)$$

推計値の  $pg_j^{go}$ 、 $pg_j^{ge}$  に対して基準マトリクスでも GDP に対する各要素の割合を計算できる。ここでは、その割合をそれぞれ  $\overline{\varphi_j^{go}}$ 、 $\overline{\varphi_j^{ge}}$  とする。推計値と基準マトリクスにおける GDP に対する各要素の割合は大きな変化がないと仮定する。

GDP に対する各要素と基準マトリクスとの乖離割合を  $eg_j^{(f_1)}$  とし、以下のように表す。

$$qg_j^{(f_1)} = \overline{\varphi_j^{(f_1)}} \cdot eg_j^{(f_1)} \quad f_1 \in F_1, j \in J \quad (5.12)$$

ここで、 $f_1 \in F_1$  を生産側の要素、賃金、資本減耗、土地、税金、補助金(GDP の生産要素)、家計消費、政府消費、資本形成、輸出、輸入(GDP の消費要素)を持つ集合とする。

次に、この乖離割合  $eg_j^{(f_1)}$  を 0 から 1 までの値をとる確率密度  $w_{2j}^{(f_1)}$  を用いて以下のように表す。

$$eg_j^{(f_1)} = w_{2j}^{(f_1)} \cdot \overline{v_{2j}^{(f_1)}} - (1 - w_{2j}^{(f_1)}) \cdot \overline{v_{2j}^{(f_1)}} \quad f_1 \in F_1, j \in J \quad (5.13)$$

$w_{2j}^{(f_1)}$  は未知変数で、0 から 1 までの値をとる。 $\overline{v_{2j}^{(f_1)}}$  は誤差  $eg_j^{(f_1)}$  の値の範囲となる。そして、目的関数にこれらの項を追加する。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\theta_{i,j}} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \overline{\gamma_{1s}^{(k_1)}} \cdot \left[ w_{1s}^{(k_1)} \ln w_{1s}^{(k_1)} + (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \ln (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \right] \\ & + \sum_{f \in F_1} \sum_{j \in J_{GDP}} \overline{\gamma_{2j}^{(f_1)}} \cdot \left[ w_{2j}^{(f_1)} \ln w_{2j}^{(f_1)} + (1 - w_{2j}^{(f_1)}) \ln (1 - w_{2j}^{(f_1)}) \right] \end{aligned} \quad (5.14)$$

ここで、 $\overline{\gamma_{2j}^{(f_1)}}$  は重みを表す係数である。 $J_{GDP}$  は GDP の生産と消費の要素を表す集合である。

## 2) 輸出税率、輸入税率、輸送マージン率

輸出、輸入に対する税金、補助金、国際輸送マージンは各財  $i$  に対して決まる。従って、輸出額に対する輸出税率、輸入額に対する輸入税率、輸入額に対する輸送マージン率を、 $qt_{i, "xtax"}$ 、 $qt_{i, "mtax"}$ 、 $qt_{i, "itp"}$  とすると以下のように表される。

$$x_{i, "xtax"} = qt_{i, "xtax"} \cdot (x_{i, "exp"} - x_{i, "xtax"}) \quad i \in I_c \quad (5.15)$$

$$x_{i, "mtax"} = qt_{i, "mtax"} \cdot x_{i, "imp"} \quad i \in I_c \quad (5.16)$$

$$x_{i, "itp"} = qt_{i, "itp"} \cdot x_{i, "imp"} \quad i \in I_{gd} \quad (5.17)$$

ここで、 $I_c$  は財サービスの集合、 $I_{gd}$  は財の集合を表す。

次に、基準マトリクスにおける輸出税率、輸入税率、輸送マージン率をそれぞれ  $\overline{\pi_{i, \text{"max"}}}$ 、 $\overline{\pi_{i, \text{"imp"}}}$  とする。基準マトリクスの輸出税率、輸入税率、輸送マージン率と推計値の輸出税率、輸入税率、輸送マージン率との乖離割合を  $et_{i,j}$  とし、以下のように表す。

$$qt_{i,j} = \overline{\varphi_{i,j}} \cdot et_{i,j} \quad i \in I_c, j \in J_{trdax} \quad (5.18)$$

ここで、 $J_{trdax}$  は輸出税、輸入税、輸送マージンを要素に持つ集合である。

次に、この乖離割合  $et_{i,j}$  を 0 から 1 までの値をとる確率密度  $w_{3i,j}$  を用いて以下のように表す。

$$et_{i,j} = w_{3i,j} \cdot \overline{v_{3i,j}} - (1 - w_{3i,j}) \cdot \overline{v_{3i,j}} \quad i \in I_c, j \in J_{trdax} \quad (5.19)$$

$\overline{v_{3i,j}}$  は誤差  $et_{i,j}$  の値の範囲となる。そして、目的関数にこれらの項を追加する。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\theta_{i,j}} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \overline{\gamma_{1s}^{(k_i)}} \cdot \left[ w_{1s}^{(k_i)} \ln w_{1s}^{(k_i)} + (1 - w_{1s}^{(k_i)}) \ln (1 - w_{1s}^{(k_i)}) \right] \\ & + \sum_{f \in F_i} \sum_{j \in J} \overline{\gamma_{2j}^{(f_i)}} \cdot \left[ w_{2j}^{(f_i)} \ln w_{2j}^{(f_i)} + (1 - w_{2j}^{(f_i)}) \ln (1 - w_{2j}^{(f_i)}) \right] \\ & + \sum_{i \in I_c} \sum_{j \in J_{trdax}} \overline{\gamma_{3i,j}} \cdot \left[ w_{3i,j} \ln w_{3i,j} + (1 - w_{3i,j}) \ln (1 - w_{3i,j}) \right] \end{aligned} \quad (5.20)$$

ここで、 $\overline{\gamma_{3i,j}}$  は重みを表す係数である。

### 3) 生産額、付加価値額、賃金の産業間でのシェア

次に国全体の生産額、付加価値額、賃金に対する各産業の生産額、付加価値額、賃金は保存するとする。国全体の生産額、付加価値額、賃金に対する各部門  $j$  の生産額、付加価値額、賃金を  $qs_j^{\text{"so"}}$ 、 $qs_j^{\text{"va"}}$ 、 $qs_j^{\text{"la"}}$  とすると以下のように表すことができる。

$$qs_j^{\text{"so"}} = \frac{y_j}{\sum_{j \in J_p} y_j} \quad j \in J_p \quad (5.21)$$

$$qs_j^{\text{"va"}} = \frac{\sum_{i \in I_w} x_{i,j}}{\sum_{j \in J_p} \sum_{i \in I_w} x_{i,j}} \quad j \in J_p \quad (5.22)$$

$$qs_j^{''la''} = \frac{x_{i,j}}{\sum_{j \in J_p} x_{i,j}} \quad i = labor, \quad j \in J_p \quad (5.23)$$

ここで、集合  $J_p$  は生産活動の集合、 $I_{va}$  は付加価値の要素の集合を表す。 $qs_j^{(f_2)}$  はフロー  $f_2$  の部門  $j$  のシェアを表す。 $f_2 \in F_2$  は生産、付加価値、賃金を要素として持つ。

次に、基準マトリクスにおける国全体の生産額、付加価値額、賃金に対する部門  $j$  の生産額、付加価値額、賃金の割合をそれぞれ  $\overline{\sigma_j^{''so''}}$ 、 $\overline{\sigma_j^{''va''}}$ 、 $\overline{\sigma_j^{''la''}}$  とする。 $\overline{\sigma_j^{''so''}}$ 、 $\overline{\sigma_j^{''va''}}$ 、 $\overline{\sigma_j^{''la''}}$  と推計値の  $qs_j^{''so''}$ 、 $qs_j^{''va''}$ 、 $qs_j^{''la''}$  との乖離を最小とするように Cross-entropy の関数を目的関数に加える。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\theta_{i,j}} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \overline{\gamma_{1s}^{(k_1)}} \cdot \left[ w_{1s}^{(k_1)} \ln w_{1s}^{(k_1)} + (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \ln (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \right] \\ & + \sum_{f \in F_1} \sum_{j \in J} \overline{\gamma_{2j}^{(f_1)}} \cdot \left[ w_{2j}^{(f_1)} \ln w_{2j}^{(f_1)} + (1 - w_{2j}^{(f_1)}) \ln (1 - w_{2j}^{(f_1)}) \right] \\ & + \sum_{i \in I_e} \sum_{j \in J_{output}} \overline{\gamma_{3i,j}} \cdot \left[ w_{3i,j} \ln w_{3i,j} + (1 - w_{3i,j}) \ln (1 - w_{3i,j}) \right] \\ & + \sum_{f_2 \in F_2} \sum_{j \in J_p} \overline{\gamma_{4j}^{(f_2)}} \cdot qs_j^{(f_2)} \ln \frac{qs_j^{(f_2)}}{\overline{\sigma_j^{(f_2)}}} \end{aligned} \quad (5.24)$$

ここで、 $\overline{\gamma_{4j}^{(f_2)}}$  は重みを表す係数である。

### (3) エネルギーフローの追加

エネルギーフロー  $m_{i,j}$  は、前項の貨幣フロー  $x_{i,j}$  とその価格  $pr_{i,j}$  を用いて記述される。すなわち、以下のように表される。

$$m_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{pr_{i,j}} \quad i \in I_e \text{ or } j \in J_e \quad (5.25)$$

ここで、 $m_{i,j}$  は財  $i$  の部門  $j$  へのエネルギー投入フロー、もしくは財  $j$ 、部門  $i$  の産出フローを表す。 $pr_{i,j}$  はエネルギー価格でそれぞれの  $i, j$  に応じた価格を表す。例えば、 $i$  が石炭、 $j$  が”国外”だった場合、石炭の輸出価格を表し、 $i$  が石油、 $j$  が”紙パルプ”だった場合、紙パルプ部門への石油の投入量を表す。集合  $I_e$  はエネルギー財の集合、集合  $J_e$  はエネルギー財を生産する部門の集合を表す。

次に、経済情報と同様に、エネルギー量  $m_{i,j}$  に対しても統計  $s$  の情報  $\overline{d_{2s}^{(k_2)}}$  が得られたと

する。情報  $\overline{d_{2s}^{(k_2)}}$  は誤差の割合  $em_s^{(k_2)}$  をもっているとする、以下のように表される。

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \overline{g_{2i,j}^{(k_2)}} \cdot m_{i,j} = \overline{d_{2s}^{(k_2)}} \cdot em_s^{(k_2)} \quad k_2 \in K_2, \quad s \in S \quad (5.26)$$

$\overline{g_{2i,j}^{(k_2)}}$  は 0 と 1 を持つ設定変数である。その情報種  $k_2$  に対応する  $i, j$  には 1、それ以外にはゼロが入っている。

この乖離割合  $em_s^{(k_2)}$  を 0 から 1 までの値をとる確率密度  $w_{4j}^{(k_2)}$  を用いて以下のように表す。

$$\ln em_s^{(k_2)} = w_{4s}^{(k_2)} \cdot \overline{v_{4s}^{(k_2)}} - \left(1 - w_{4s}^{(k_2)}\right) \cdot \overline{v_{4s}^{(k_2)}} \quad k_2 \in K_2, \quad s \in S \quad (5.27)$$

$\overline{v_{4s}^{(k_2)}}$  は誤差  $em_s^{(k_2)}$  の値の範囲となる。エネルギー統計の統計誤差を最小にするように目的関数にその項を追加する。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\theta_{i,j}} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \overline{\gamma_{1s}^{(k_1)}} \cdot \left[ w_{1s}^{(k_1)} \ln w_{1s}^{(k_1)} + \left(1 - w_{1s}^{(k_1)}\right) \ln \left(1 - w_{1s}^{(k_1)}\right) \right] \\ & + \sum_{f \in F_1} \sum_{j \in J} \overline{\gamma_{2j}^{(f_1)}} \cdot \left[ w_{2j}^{(f_1)} \ln w_{2j}^{(f_1)} + \left(1 - w_{2j}^{(f_1)}\right) \ln \left(1 - w_{2j}^{(f_1)}\right) \right] \\ & + \sum_{i \in I_e} \sum_{j \in J_{\text{producer}}} \overline{\gamma_{3i,j}^{(f_2)}} \cdot \left[ w_{3i,j} \ln w_{3i,j} + \left(1 - w_{3i,j}\right) \ln \left(1 - w_{3i,j}\right) \right] \\ & + \sum_{f_2 \in F_2} \sum_{j \in J_p} \overline{\gamma_{4j}^{(f_2)}} \cdot q s_j^{(f_2)} \ln \frac{q s_j^{(f_2)}}{\sigma_j^{(f_2)}} \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{k_2 \in K_2} \overline{\gamma_{5s}^{(k_2)}} \cdot \left[ w_{4s}^{(k_2)} \ln w_{4s}^{(k_2)} + \left(1 - w_{4s}^{(k_2)}\right) \ln \left(1 - w_{4s}^{(k_2)}\right) \right] \end{aligned} \quad (5.28)$$

ここで、 $\overline{\gamma_{5s}^{(k_2)}}$  は重みを表す設定変数である。

#### (4) 価格に関する制約

さらに、ある地域内において、財別の生産、消費、輸出入の各フローの価格は大きな差がないとして、目的関数に、価格の乖離度を表す項を追加する。財  $i$  の生産価格、輸出価格、輸入価格、国内消費平均価格、部門  $j$  における消費価格をそれぞれ  $pav_i^{\text{"pro"}}$ 、 $pav_i^{\text{"exp"}}$ 、 $pav_i^{\text{"imp"}}$ 、 $pav_i^{\text{"dom"}}$ 、 $paj_{i,j}$  とする。それぞれの価格は以下のように表される。

$$pav_i^{\text{"pro"}} = pr_{i,j} \quad \forall i \in I_e, j = i's \text{ producer} \quad (5.29)$$

$$pav_i^{\text{"exp"}} = pr_{i, \text{"exp"}} \quad \forall i \in I_e \quad (5.30)$$

$$pav_i^{\text{"imp"}} = pr_{\text{"imp"}, i} \quad \forall i \in I_e \quad (5.31)$$

$$pav_i^{dom} = \frac{\sum_{j \in J_{dom}} x_{i,j}}{\sum_{j \in J_{dom}} m_{i,j}} \quad \forall i \in I_e \quad (5.32)$$

$$paj_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{m_{i,j}} \quad \forall i \in I_e, \quad j \in J_{dom} \quad (5.33)$$

ここで、 $J_{dom}$  は国内部門、すなわち生産活動と消費活動を表す。次に、財  $i$  の生産価格と輸出価格、輸入価格と国内消費平均価格の乖離度をそれぞれ、 $ep_{1i}^{exp}$ 、 $ep_{1i}^{imp}$  とし、さらに、国内消費平均価格と部門  $j$  における消費価格の乖離度を  $ep_{2i,j}$  とする。これらの乖離は以下のように表される。

$$pav_i^{exp} = ep_{1i}^{exp} pav_{i,pro} \quad \forall i \in I_e \quad (5.34)$$

$$pav_i^{dom} = ep_{1i}^{imp} \cdot pav_i^{dom} \quad \forall i \in I_e \quad (5.35)$$

$$pav_i^{dom} = ep_{2i,j} paj_{i,j} \quad \forall i \in I_e, \quad j \in J_{dom} \quad (5.36)$$

そして、前述の価格の乖離度を以下のように表す。

$$\ln ep_{1i}^{(f_3)} = wp_{1i}^{(f_3)} \cdot \overline{vp_{1i}^{(f_3)}} - (1 - wp_{1i}^{(f_3)}) \cdot \overline{vp_{1i}^{(f_3)}} \quad \forall i \in I_e, \quad f_3 \in F_3 \quad (5.37)$$

$$\ln ep_{2i,j} = wp_{2i,j} \cdot \overline{vp_{2i,j}} - (1 - wp_{2i,j}) \cdot \overline{vp_{2i,j}} \quad \forall i \in I_e, \quad j \in J_{dom} \quad (5.38)$$

ここで、集合  $F_3$  は輸出、輸入を要素にもつ。 $wp_{1i}^{(f_3)}$ 、 $wp_{2i,j}$  は未知変数で、0 から 1 までの値をとる。 $\overline{vp_{1i}^{(f_3)}}$ 、 $\overline{vp_{2i,j}}$  は価格比の値の範囲となる。

式(5.28)の目的関数にさらに価格の乖離を表す項を追加し、以下のように目的関数を設定する。

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\theta_{i,j}} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \overline{\gamma_{1s}^{(k_1)}} \cdot \left[ w_{1s}^{(k_1)} \ln w_{1s}^{(k_1)} + (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \ln (1 - w_{1s}^{(k_1)}) \right] \\
& + \sum_{f \in F_1} \sum_{j \in J} \overline{\gamma_{2j}^{(f_1)}} \cdot \left[ w_{2j}^{(f_1)} \ln w_{2j}^{(f_1)} + (1 - w_{2j}^{(f_1)}) \ln (1 - w_{2j}^{(f_1)}) \right] \\
& + \sum_{i \in I_e} \sum_{j \in J_{\text{dom}}} \overline{\gamma_{3i,j}} \cdot \left[ w_{3i,j} \ln w_{3i,j} + (1 - w_{3i,j}) \ln (1 - w_{3i,j}) \right] \\
& + \sum_{f_2 \in F_2} \sum_{j \in J_p} \overline{\gamma_{4j}^{(f_2)}} \cdot q s_j^{(f_2)} \ln \frac{q s_j^{(f_2)}}{\sigma_j^{(f_2)}} \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{k_2 \in K_2} \overline{\gamma_{5s}^{(k_2)}} \cdot \left[ w_{4s}^{(k_2)} \ln w_{4s}^{(k_2)} + (1 - w_{4s}^{(k_2)}) \ln (1 - w_{4s}^{(k_2)}) \right] \\
& + \sum_{f_3 \in F_3} \sum_{i \in I_e} \overline{\gamma_{6i}^{(f_3)}} \cdot \left[ w p_{1i}^{(f_3)} \ln w p_{1i}^{(f_3)} + (1 - w p_{1i}^{(f_3)}) \ln (1 - w p_{1i}^{(f_3)}) \right] \\
& + \sum_{j \in J_{\text{dom}}} \sum_{i \in I_e} \overline{\gamma_{7i,j}} \cdot \left[ w p_{2i,j} \ln w p_{2i,j} + (1 - w p_{2i,j}) \ln (1 - w p_{2i,j}) \right]
\end{aligned} \tag{5.39}$$

ここで、 $\overline{\gamma_{6i}^{(f_3)}}$ 、 $\overline{\gamma_{7i,j}}$  は重みを表す設定変数である。

### 5.3.4 貿易収支計算

貿易収支計算では、総輸出入額、総輸出入量の収支条件を制約条件として、Cross-entropy法を用いて地域内調整計算で得られた各国の貿易額、貿易量の貿易収支を調整した。このとき最小とするのは、各国の輸出入額の修正割合、輸出入量の修正割合、世界価格から各フローの価格の乖離度合いとした。

まず、国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸出額を  $EX_{i,r}$ 、輸入額を  $EM_{i,r}$ 、輸出量を  $MX_{i,r}$ 、輸入量を  $MM_{i,r}$  とすると、世界全体の輸出額と輸入額の総計、輸出入量の総計は一致する。それらの条件を式(5.40)、(5.41)で表す。

$$\sum_r EX_{i,r} = \sum_s EM_{i,s} \quad \forall i \in I, r \in R \tag{5.40}$$

$$\sum_r MX_{i,r} = \sum_s MM_{i,s} \quad \forall i \in I_e, r \in R \tag{5.41}$$

輸出額、輸入額は、地域内調整計算の推計値の輸出額  $\overline{REX_{i,r}}$  と輸入額  $\overline{REM_{i,r}}$  からそれぞれ割合  $c_{i,r}^{\text{"exp"}}$ 、 $c_{i,r}^{\text{"imp"}}$  だけ乖離しているとする以下のように表される。

$$EX_{i,r} = \overline{REX_{i,r}} \cdot c_{i,r}^{\text{"exp"}} \quad \forall i \in I, r \in R \tag{5.42}$$

$$EM_{i,r} = \overline{REM_{i,r}} \cdot c_{i,r}^{\text{"imp"}} \quad \forall i \in I, r \in R \tag{5.43}$$

エネルギー財の輸出入量も同様に、地域内調整計算の結果の輸出入量  $\overline{RMX_{i,r}}$  と輸出入量

$\overline{RMM_{i,r}}$  からそれぞれ割合  $mc_{i,r}^{\text{"exp"}}$ 、 $mc_{i,r}^{\text{"imp"}}$  だけ乖離しているとする以下のように表される。



$$mc_{i,r}^{exp} = \frac{MX_{i,r}}{RMX_{i,r}} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R \quad (5.44)$$

$$mc_{i,r}^{imp} = \frac{MM_{i,r}}{RMM_{i,r}} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R \quad (5.45)$$

次に、国  $r$ 、エネルギー財  $i$  の輸出価格(fob)、輸入価格(fob)を  $PX_{i,r}$ 、 $PM_{i,r}$  とすると、輸出入額、輸出入量を用いて以下のように表される。

$$PX_{i,r} = \frac{EX_{i,r}}{MX_{i,r}} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R \quad (5.46)$$

$$PM_{i,r} = \frac{EM_{i,r}}{MM_{i,r}} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R \quad (5.47)$$

また、世界平均価格(fob)  $WP_i$  を、総輸出額を総輸出量で除したものとすると、

$$WP_i = \frac{\sum_r EX_{i,r}}{\sum_r MX_{i,r}} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R \quad (5.48)$$

となる。国  $r$  のエネルギー財  $i$  の輸出価格、輸入価格の世界平均価格との比をそれぞれ  $pc_{i,r}^{exp}$ 、

$pc_{i,r}^{imp}$  とすると、輸出価格、輸入価格  $PX_{i,r}$ 、 $PM_{i,r}$  は以下のように表される。

$$PX_{i,r} = WP_i \cdot pc_{i,r}^{exp} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R \quad (5.49)$$

$$PM_{i,r} = WP_i \cdot pc_{i,r}^{imp} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R \quad (5.50)$$

地域内調整計算の計算結果からの乖離  $c_{i,r}^{(f_3)}$ 、 $mc_{i,r}^{(f_3)}$ 、世界平均価格と各輸出入価格の乖離  $pc_{i,r}^{(f_3)}$  をそれぞれ以下のように表す。

$$\ln c_{i,r}^{(f_3)} = wc_{i,r}^{(f_3)} \cdot \overline{vc_{i,r}^{(f_3)}} - (1 - wc_{i,r}^{(f_3)}) \cdot \overline{vc_{i,r}^{(f_3)}} \quad \forall i \in I, \quad r \in R, \quad f_3 \in F_3 \quad (5.51)$$

$$\ln mc_{i,r}^{(f_3)} = wmc_{i,r}^{(f_3)} \cdot \overline{vmc_{i,r}^{(f_3)}} - (1 - wmc_{i,r}^{(f_3)}) \cdot \overline{vmc_{i,r}^{(f_3)}} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R, \quad f_3 \in F_3 \quad (5.52)$$

$$\ln pc_{i,r}^{(f_3)} = wpc_{i,r}^{(f_3)} \cdot \overline{vpc_{i,r}^{(f_3)}} - (1 - wpc_{i,r}^{(f_3)}) \cdot \overline{vpc_{i,r}^{(f_3)}} \quad \forall i \in I_e, \quad r \in R, \quad f_3 \in F_3 \quad (5.53)$$

$wc_{i,r}^{(f_3)}$ 、 $wmc_{i,r}^{(f_3)}$ 、 $wpc_{i,r}^{(f_3)}$  は未知変数で、0 から 1 までの値をとる。 $\overline{vc_{i,r}^{(f_3)}}$ 、 $\overline{vmc_{i,r}^{(f_3)}}$ 、 $\overline{vpc_{i,r}^{(f_3)}}$

は乖離  $c_{i,r}^{(f_3)}$ 、 $mc_{i,r}^{(f_3)}$ 、 $pc_{i,r}^{(f_3)}$  の値の範囲となる。目的関数を以下のようにし、それを最小化する。

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} \sum_{f_3 \in F_3} \overline{\gamma c_{i,r}^{(f_3)}} \cdot \left[ wc_{i,r}^{(f_3)} \ln wc_{i,r}^{(f_3)} + (1 - wc_{i,r}^{(f_3)}) \ln (1 - wc_{i,r}^{(f_3)}) \right] \\
& + \sum_{i \in Ie} \sum_{r \in R} \sum_{f_3 \in F_3} \overline{\gamma mc_{i,r}^{(f_3)}} \cdot \left[ wmc_{i,r}^{(f_3)} \ln wmc_{i,r}^{(f_3)} + (1 - wmc_{i,r}^{(f_3)}) \ln (1 - wmc_{i,r}^{(f_3)}) \right] \\
& + \sum_{i \in Ie} \sum_{r \in R} \sum_{f_3 \in F_3} \overline{\gamma pc_{i,r}^{(f_3)}} \cdot \left[ wpc_{i,r}^{(f_3)} \ln wpc_{i,r}^{(f_3)} + (1 - wpc_{i,r}^{(f_3)}) \ln (1 - wpc_{i,r}^{(f_3)}) \right]
\end{aligned} \tag{5.54}$$

ここで、 $\overline{\gamma c_{i,r}^{(f_3)}}$ 、 $\overline{\gamma mc_{i,r}^{(f_3)}}$ 、 $\overline{\gamma pc_{i,r}^{(f_3)}}$  は重みを表す設定変数である。

## 5.4 適用時の設定等

### 5.4.1 基準マトリクス

各年の推計は前年で推計されたマトリクスを基準マトリクスとして用いる。例えば、1999 年の 1 回目の推計には 2000 年の調整されたマトリクスを用いる。また、1999 年の 2 回目の推計には 1999 年の 1 回目で調整されたマトリクスを用いる。ただし、推計を開始する 2000 年の 1 回目の調整計算は、GTAP(Dimaranan, 2006)を基準マトリクスとして用いた。

### 5.4.2 推計に用いた統計

本研究の推計に用いた統計、もしくはデータベースの一覧を表 5.4 に示す。

表 5.4 統計一覧

統計名	発行機関	発刊年
Global Trade Analysis Prodoject	Purdue University	2006
OECD Input-Output Tables	経済協力開発機構(OECD)	2006a
OECD Input-Output Tables	経済協力開発機構(OECD)	2002
OECD Input-Output Tables	経済協力開発機構(OECD)	1997
アジア国際産業連関表	アジア経済研究所	2006
アジア国際産業連関表	アジア経済研究所	2001
アジア国際産業連関表	アジア経済研究所	1998
アジア国際産業連関表	アジア経済研究所	1992
アセアン諸国国際産業連関表	アジア経済研究所	1982
Balance of Payments	国際通貨基金(IMF)	2007a
Commodity Trade Statistics Database	国連(UN)	2006b
FAOSTAT	国連食料農業機関(FAO)	2005
General Industrial Statistics Database	国連(UN)	2004
Industrial Demand-Supply Balance Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev2)	国連工業開発機関(UNIDO)	2006
Industrial Demand-Supply Balance Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev3)	国連工業開発機関(UNIDO)	2006
Industrial Statistics Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev2)	国連工業開発機関(UNIDO)	2005
Industrial Statistics Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev3)	国連工業開発機関(UNIDO)	2005
International Trade by Commodity statistics	経済協力開発機構(OECD)	2005
National Accounts Database	国連(UN)	2006a
OECD Statistics on International Trade in Services	経済協力開発機構(OECD)	2006b
Structural Statistics for Industry and Services	経済協力開発機構(OECD)	2003
The OECD STAN database for Industrial Analysis	経済協力開発機構(OECD)	2003
World Development Indicators	世界銀行(World Bank)	2006
Enerdata	Enerdata	2006
Energy balances of OECD countries	国際エネルギー機関(IEA)	2007
Energy balances of OECD non-countries	国際エネルギー機関(IEA)	2007
Energy Statistics	アメリカエネルギー省	2007
HongKong's Merchandise Trade Statisitcs	香港統計局	2007
International Historical Statistics	Mitchell	2003
Soviet Economic Statistical Series	Slavic Research Center	1996
The Soviet Economy 1970-1990 A Statistical Analysis	International Trade Press	1990
アジア長期経済統計-工業発展-	拓殖大学アジア情報センター	2001
台湾国民経済計算	National Statistics Republic of China	2007
Global Trade Database	Fujimori and Matsuoka	2007

## 5.5 結果

推計の結果得られた社会会計表の例として 2000 年における日本の社会会計表を付録に示す。以下では、エネルギーフローの結果に焦点を当てて結果を示す。

### 5.5.1 世界全体の化石燃料生産量推移

世界全体の化石燃料の生産量を燃料種別(石炭、原油、天然ガス)で図 5.2、図 5.3、図 5.4 に示す。凡例の IEA は IEA(2007a, 2007b)、enerdata は enerdata(2007)、UN は UN(2007)、EIA は EIA(2007)、BP は BP(2007)を表す。

石炭について見ると、本研究の推計値は IEA、enerdata、EIA と近い推移をしている。それと比べると BP はやや小さい値、UN はやや大きな値をとっている。原油は UN と EIA がやや大きめの値を示しているが、それ以外でははっきりとした差異は見られない。一方、天然ガスでは UN が他統計と比べるとかなり大きな値を示しており、他の統計、本研究推計値とは明確に異なる。

すべてのエネルギー財で UN は他の統計と比べて大きめの値を示していた。一概に UN の統計値が誤りであるとは言えないが、いくつかの統計と比較してみると、UN の天然ガスは過剰に報告している可能性があることがわかる。

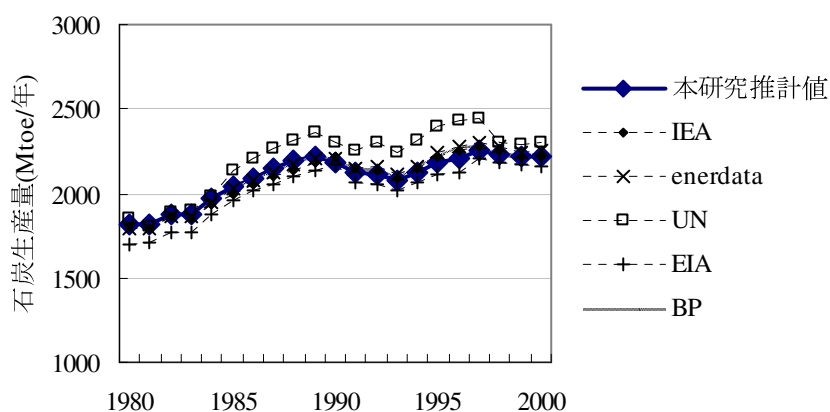


図 5.2 石炭の生産量推移

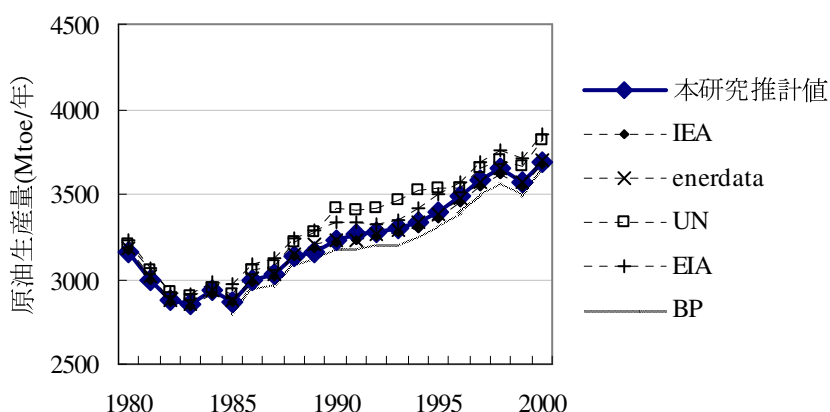


図 5.3 原油の生産量推移

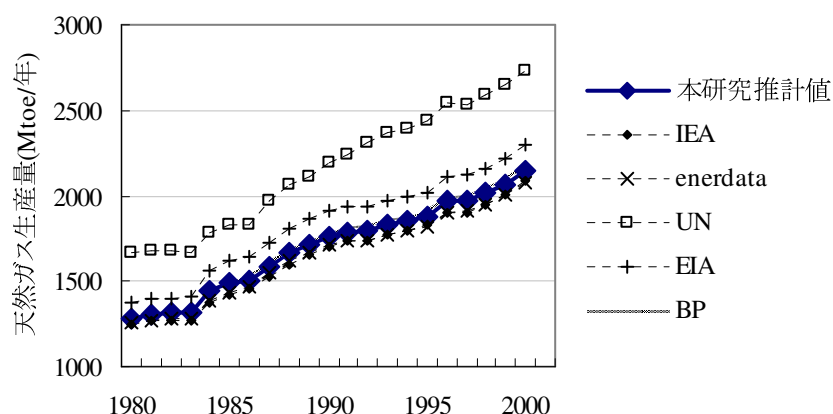


図 5.4 天然ガスの生産量推移

### 5.5.2 国別エネルギー消費量

国別の化石燃料由来の一次エネルギー供給量について示す。ここでいうエネルギー消費量とは石炭、石油、天然ガスの生産量に輸入量を足したのから輸出量を減じた量である。本項では、国別の国内エネルギー消費量を IEA(2007a,b)と比較した。まず a) 国内エネルギー消費量の大きな国について詳しく見た後に、b) IEA と大きく異なる値を示した国をピックアップし、その相違が何によるものなのかを示す。

#### (1) 国内エネルギー消費量の大きな国

まず、2000 年において国内エネルギー消費量の最も大きかった 10 ヶ国(アメリカ、中国、ロシア、日本、インド、ドイツ、イギリス、カナダ、韓国、イタリア)について示す。対象期間における IEA の国内エネルギー消費量に対する本研究推計値の割合を計算し、その割合の国別の年平均値、年中央値、最大を示した年の値(最大値)、最小を示した年の値(最小値)を表 5.5 に示す。これらの値は 1 に近いほど統計値と近いことを意味する。また、表 5.5 には 2000 年の国内エネルギー消費量も併せて示す。

IEA との比較の平均値を見ると、ロシアが最も大きく 1.04 であった。中央値で見てもロシアは最も大きい 1.04 であった。ロシアを除く国は平均値、中央値ともに 1.02 以内であった。また、最大値で見ると、最も大きかったのはロシアの 1.07、最小値で見ると最も小さかったのは、イギリスの 0.93 であり、エネルギー消費量の多い国での修正量は小さい範囲内(±7%以内)であったことがわかる。

表 5.5 国内エネルギー消費量の大きかった国における IEA と本研究推計値の比較

	2000年の国内エネルギー消費量(Mtoe)	平均値	中央値	最大値	最小値
アメリカ	1,989	1.00	1.00	1.03	0.98
中国	873	0.99	1.00	1.02	0.97
ロシア	568	1.04	1.04	1.07	1.02
日本	424	1.00	1.00	1.02	0.96
インド	298	1.00	1.00	1.03	0.97
ドイツ	284	1.00	1.00	1.03	0.98
イギリス	207	1.00	1.01	1.05	0.93
カナダ	192	1.02	1.02	1.06	0.99
韓国	173	1.01	1.02	1.06	0.94
イタリア	159	1.00	1.00	1.03	0.97

## (2) 国内エネルギー消費量の IEA との乖離の要因

次に IEA との乖離の大きかった国とその要因について示すが、まず IEA がカバーしている国すべて(133 ヶ国)について示す。図 5.5 は対象期間における IEA の国内エネルギー消費量に対する本研究推計値の国内エネルギー消費量を国別に示したものである。

ほとんどの国は、1 付近、0.8-1.2 以内の範囲に集まっていることがわかる。しかし、一部の国では IEA と本研究推計でやや乖離があることがわかる。最も離れているもので、1.75 倍、0.65 倍程度の乖離であった。

次に、本研究の推計値と IEA(2007a,b)の値がどのような要因によって異なったのかということを検討するために、IEA と本研究推計値の乖離が大きかった 4 つの国、オマーン、ブルネイ、カメルーン、コンゴ民主共和国について詳しく見てみる。

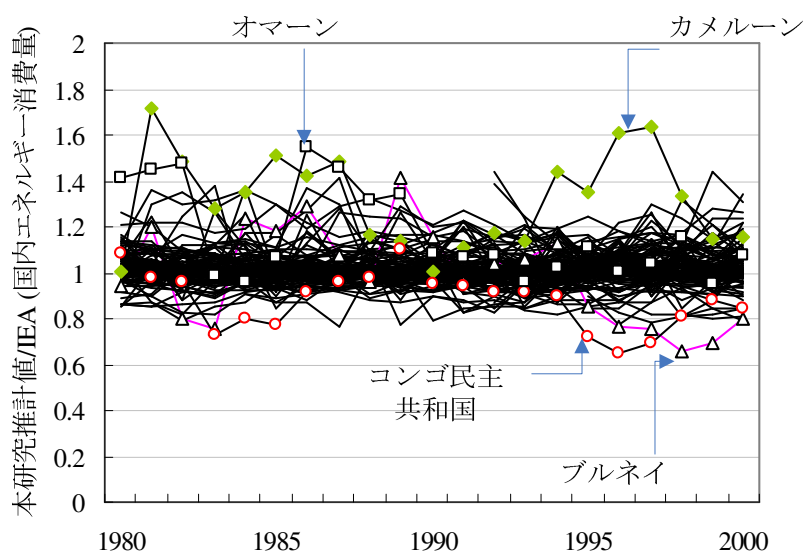


図 5.5 各国の国内エネルギー消費量の IEA との比較

オマーン、ブルネイの 2 ヶ国は、IEA 以外のエネルギー統計の情報(ここでは enerdata(2007))が推計値に影響したと考えられた。図 5.6、図 5.7 は、オマーン、ブルネイの本研究推計値、IEA と enerdata の国内エネルギー消費量を示したものである。オマーン

ンについて見ると、図 5.5 の本研究推計値は 1980 年代前半で IEA よりやや大きな値を示していたが、図 5.6 より研究推計値は enerdata と IEA の中間に位置する値であることわかる。また、ブルネイについて見ると、図 5.5 で本研究推計値は 1990 年代後半に IEA よりも小さな値をとったが、オマーンの事例と同様に、図 5.7 より本研究推計値は enerdata と IEA の中間に位置していることがわかる。

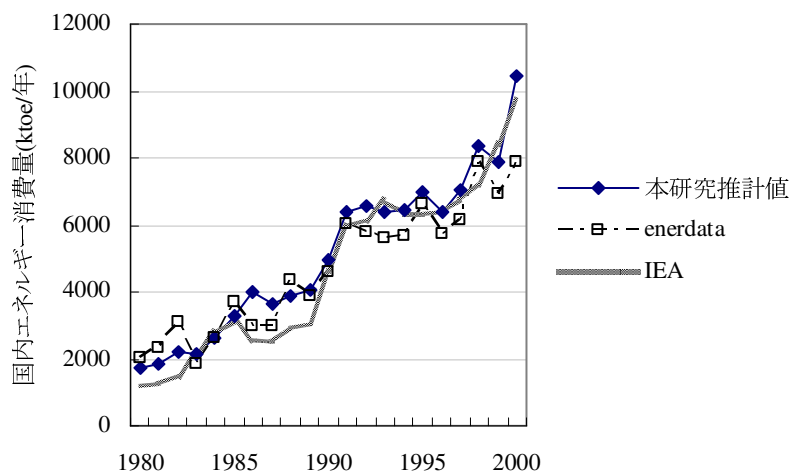


図 5.6 オマーンの国内エネルギー消費量の比較

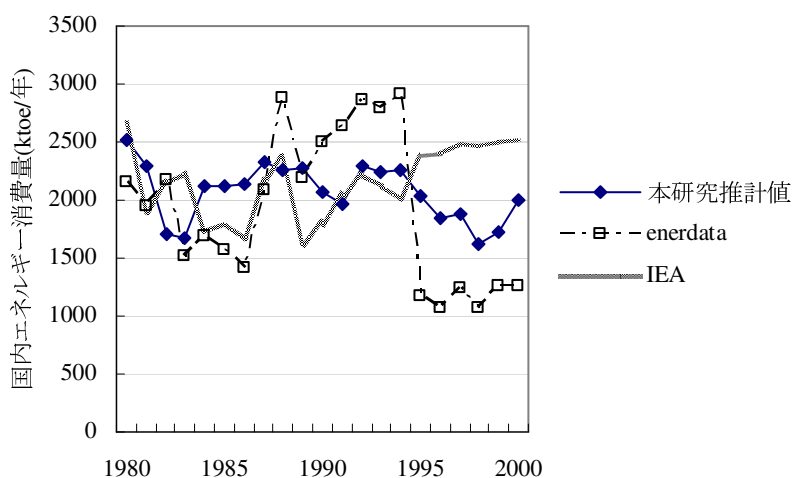


図 5.7 ブルネイの国内エネルギー消費量の比較

次にカメルーンについて見てみる。カメルーンは、原油と石油精製品の輸入がエネルギー統計(IEA)で欠測していた。これらの輸入量が経済情報から補完されることにより、本研究推計値は IEA よりも国内エネルギー消費量が大きくなった。図 5.8、図 5.9 はそれぞれ原油と石油精製品の輸入額と輸入量を示したもので左が原油、右が石油精製品を表す。

エネルギー統計の原油の輸入量は、対象期間において完全に欠測している。エネルギー統計の石油精製品の輸入量は 1980 年代前半において欠測している。一方、経済統計について見ると、エネルギー統計が欠測している期間も輸入額が存在しており、これらの経済情

報によりエネルギーフローが補完されたことがわかる。

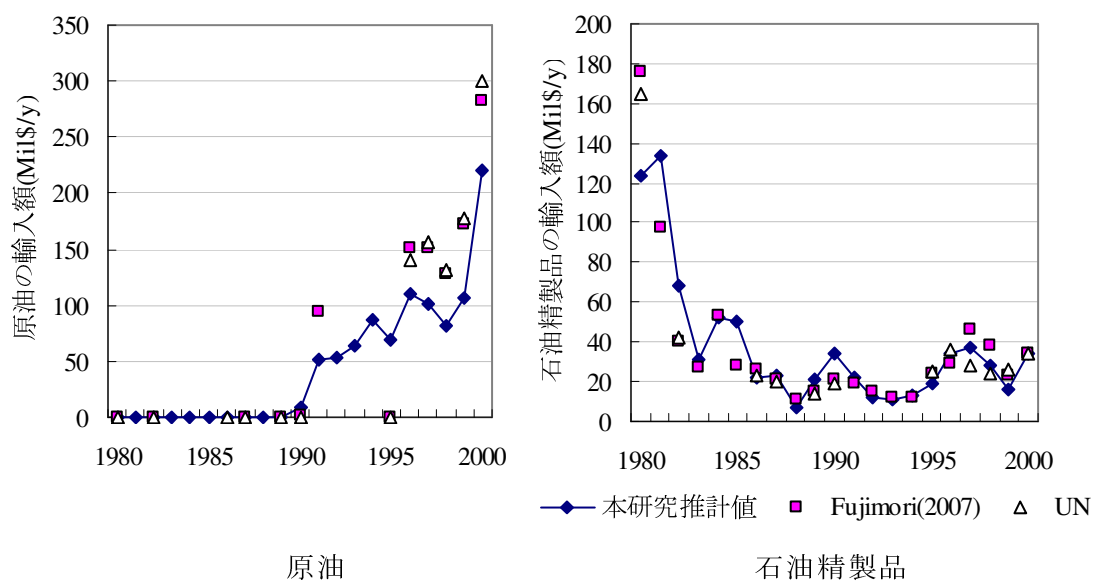


図 5.8 カメルーンにおける原油と石油精製品の輸入額

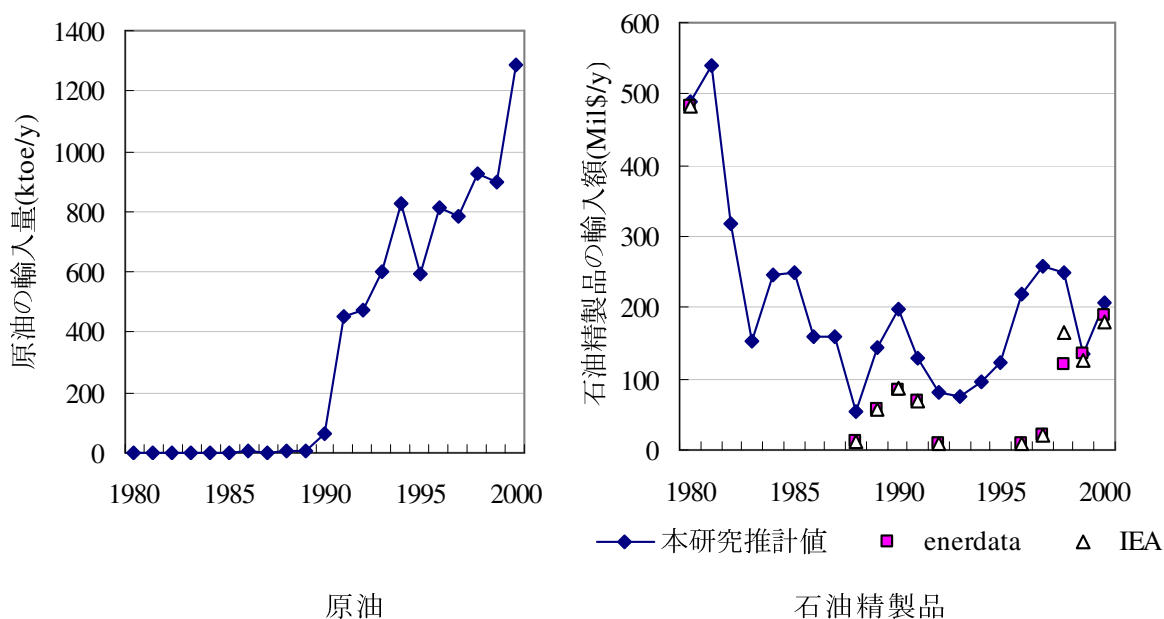


図 5.9 カメルーンにおける原油と石油精製品の輸入量

コンゴ民主共和国の場合は、IEA の原油の統計不突合(Statistical Difference) という項目の値が大きいことが本研究推計値と IEA の乖離の主たる原因と考えられた。図 5.10 はコンゴ民主共和国の国内エネルギー消費量(左軸)と IEA における原油の統計不突合の国内エネルギー消費量に対する割合(右軸)を示したものである。

特に 1990 年代中盤、1980 年代中盤において統計不突合が大きく、年によっては国内エネルギー消費量の 30% 近くに達する年も見られる。そして、統計不突合の大きさとほぼ比例するように、本研究推計値とエネルギー統計の乖離も大きくなっている様子がわかる。



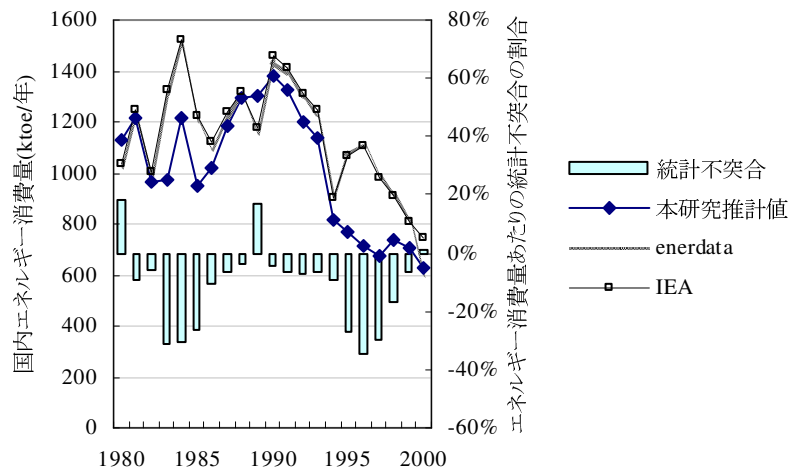


図 5.10 コンゴのエネルギー消費量と統計不突合の割合

### 5.5.3 エネルギー統計の欠測の補完

エネルギー統計の欠測を補完した例を前項で示したが、本項ではそのような欠測が世界全体ではどの程度あったのかということを示す。

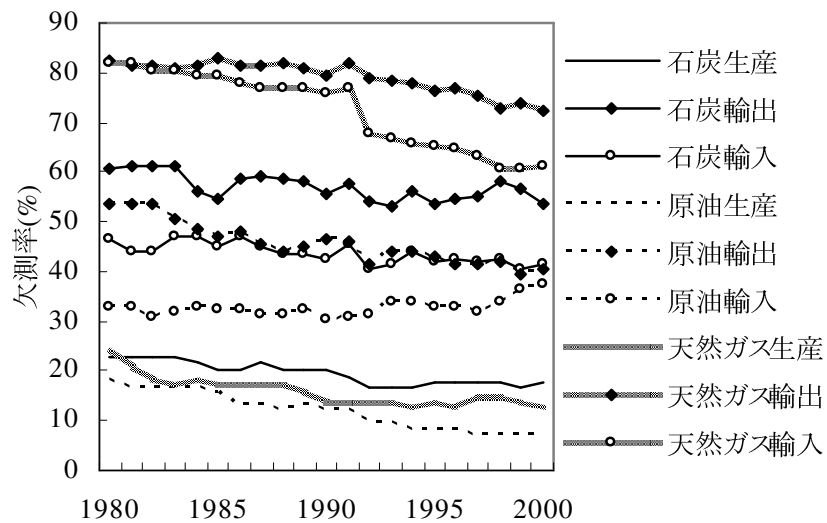


図 5.11 IEA Energy Balance(IEA, 2007a; 2007b)の欠測率

図 5.11 は IEA(2007a,b)の石炭、原油、天然ガス各財の生産、輸出、輸入別の欠測率を表したものである。ここでいう欠測率とは、IEA(2007a; 2007b)には値が存在しないが本研究の推計には値が存在する国数を、本研究の推計に値が存在する国数で除したものである(ただし、集約化地域は除く)。まず、生産、輸出、輸入別で見ると、生産の欠測率はいずれの財も 30%以内で比較的小さいが、輸出入はいずれの財でも 30%以上であり、財によっては 80%近くに達する。輸出と輸入を比べるといずれの財でも輸入の方が輸出よりも欠測率が低いことがわかる。財別で見ると、天然ガスの輸出入が大きな欠測率を示していて、特に

天然ガスの輸出は対象期間すべてにおいて70%以上の欠測となった。次いで石炭、原油という順番に欠測率は小さくなる。ここで示されたグラフは原油の輸入を除くと全般に右下がり傾向であり、経年変化を見た場合は、最近年ほど欠測率は小さく、過去に遡るほど欠測率が上がるという傾向が読み取れる。

#### 5.5.4 CO<sub>2</sub> 排出量

次に、推計されたエネルギー消費量から各国のCO<sub>2</sub>排出量を推計した。各燃料の消費量に排出係数と酸化される炭素割合 (IPCC, 2006) を乗じることでCO<sub>2</sub>排出量とした。また、その各国別のCO<sub>2</sub>排出量とEDGAR2000FT(Olivier *et al.*, 2005)、IEA(IEA, 2007c)、CDIAC(Marland *et al.*, 2006)、Enerdata(Enerdata, 2007)と比較する。表 5.6 に世界全体、CO<sub>2</sub>排出量が大きかった国上位10ヶ国、本研究の推計値と他機関の推計値の乖離の大きかった国における、それぞれの国のCO<sub>2</sub>排出量を示す。ここで、乖離が大きい国とは本研究推計値と他機関推計値を比較して2倍以上、もしくは1/2以下となる国とし、全部で15ヶ国存在した。

表 5.6 2000 年における CO<sub>2</sub> 排出量の比較

CO <sub>2</sub> 排出量(TgC/y)						乖離度(本研究推計値/他機関推計値)				
	本研究	EDGAR	CDIAC	IEA	enerdata	EDGAR	CDIAC	IEA	enerdata	
世界全体	6633.1	7030.3	6392.0	6717.0	6134.0	0.94	1.04	0.99	1.08	
CO <sub>2</sub> 排出量上位国	アメリカ	1605.9	1680.3	1612.6	1562.3	1533.7	0.96	1.00	1.03	1.05
	中国	815.1	938.3	829.6	833.3	784.2	0.87	0.98	0.98	1.04
	ロシア	426.3	488.2	394.4	413.5	404.7	0.87	1.08	1.03	1.05
	日本	350.0	348.4	319.7	333.5	306.4	1.00	1.09	1.05	1.14
	インド	270.1	292.9	301.3	266.7	251.3	0.92	0.90	1.01	1.07
	ドイツ	232.3	258.8	212.8	230.1	220.0	0.90	1.09	1.01	1.06
	イギリス	158.1	160.6	155.0	149.1	144.4	0.98	1.02	1.06	1.10
	カナダ	150.3	156.1	156.8	138.3	143.1	0.96	0.96	1.09	1.05
	韓国	141.7	122.9	110.5	119.0	118.7	1.15	1.28	1.19	1.19
	イタリア	121.5	126.8	111.5	116.7	115.2	0.96	1.09	1.04	1.05
本研究推計値と他研究推計値で2倍以上の乖離が見られた国	アルジェリア	20.9	21.6	49.2	19.3	18.3	0.97	0.42	1.08	1.14
	アゼルバイジャン	8.3	28.3	8.2	8.0	7.8	0.29	1.01	1.04	1.06
	オマーン	7.3	3.5	5.3	6.5	5.0	2.08	1.37	1.12	1.47
	クロアチア	5.2	16.3	5.2	4.8	4.8	0.32	1.00	1.08	1.08
	ボスニアヘルツェゴビナ	3.6	11.7	6.2	3.5	3.5	0.31	0.58	1.03	1.03
	モンゴル	2.1	0.3	2.0	2.4	2.3	6.33	1.03	0.87	0.90
	モーリシャス	1.0	0.4	0.8		0.8	2.25	1.31		1.18
	コンゴ共和国	0.6	1.3	0.4	0.6	0.6	0.46	1.40	1.08	1.08
	カンボジア	0.6	0.1	0.1	0.6	0.6	4.59	3.83	0.89	0.94
	マカオ	0.5	0.2	0.4		0.4	2.72	1.20		1.42
	ベリーズ	0.5	0.1	0.2		0.2	6.91	2.72		2.76
	ラオス	0.3	0.1	0.3		0.3	4.87	1.22		0.95
	エリトリア	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	2.41	1.16	1.13	1.18
	モルジブ	0.2	0.0	0.1		0.2	4.89	1.13		0.96
	ブータン	0.1	0.0	0.1		0.1	2.06	0.96		0.91

世界全体で見ると、本研究の推計値と他の推計値との差はそれほど大きくなく、EDGAR、CDIAC、IEA、enerdata との乖離はそれぞれ、-6%、+4%、-1%、+8%であった。排出量の多い国10ヶ国を見ても、他の推計値と本研究推計値の乖離はそれほど大きくない。最も離れていたのは韓国におけるCDIACの+28%、中国、ロシアのEDGARの-13%であった。各種機関によっても推計値はまちまちであるが、韓国のCDIACを除けば、本研究推計値と他研究推計値は±15%以内の範囲に収まっている。

一方、乖離度が大きかった国15ヶ国について見ると、とりわけEDGARとの乖離が目立ち、14ヶ国が2倍以上の乖離を示した。CDIACとの乖離が大きかったのは、3つの国でア

ルジェリア、カンボジア、ベリーズであった。IEA と本研究の推計値では 2 倍以上の乖離の見られる国はなかった。

次に、ここで示された乖離の原因について考察する。これらの乖離は、排出係数の差、用いたエネルギー消費量のデータの差の 2 つによって起こると考えられる。しかし、CDIAC を除いたすべての推計は、IPCC Guideline の方法に従ったと記載されているため、CDIAC 以外の推計と本研究の推計で用いた排出係数に大きな相違はない。また、CDIAC の排出係数と本研究の排出係数を表 5.7 に示した。

表 5.7 各推計値の排出係数(CO<sub>2</sub>/toe)

	石炭	石油	天然ガス
本研究	25.8	20	15.3
CDIAC	25.9	19.7	13.4

CDIAC の天然ガスの排出係数がやや小さな値であるものの、そこまで大きな差異は見られない。したがって、CO<sub>2</sub> 排出量の推計に用いるエネルギー消費量の差が主として CO<sub>2</sub> 排出量の差に寄与していると考えられる。EDGAR は基本的に IEA のエネルギーバランス表を用い、IEA で集約化されている地域については国連のエネルギー統計を用いている。IEA は IEA のエネルギーバランス表を、CDIAC は国連のエネルギー統計、enerdata は enerdata を用いており、本研究は、IEA、enerdata、EIA の 3 つの統計を用いている。このうち、CDIAC の乖離は国連のエネルギー統計と他の統計の不一致によるものと考えられた。国連のエネルギー統計が他の統計と異なる数値を示すものがあることは、本節 5.5.1 で示したが、具体的に、CDIAC と本研究で乖離の見られたアルジェリアについてみる。図 5.12 はアルジェリアにおける天然ガスの生産量を表しているが、UN が他の統計値と大きく異なることがわかる。

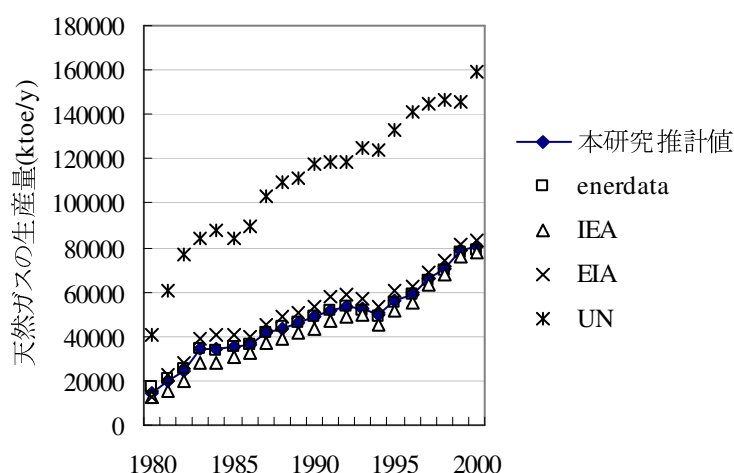


図 5.12 アルジェリアにおける天然ガスの生産量

ベリーズは、前項のカメルーンの事例のように、エネルギー統計の欠側が経済情報により補完されたため、本研究の推計値は比較可能な他の推計よりも大きな値となった。

EDGAR が本研究や他研究の推計と異なる値となっている原因は不明であるが、他の機関の推計値と比較する限り、EDGAR のこれらの国の CO<sub>2</sub> 排出量は過大評価されている可能性が高い。

### 5.5.5 原油、天然ガスの世界価格

本研究ではエネルギーと貨幣フローの推計を行い、エネルギーフローの値の補完や修正を行った。貨幣フローとエネルギーフローの関係は式(5.25)で示したように価格を用いて表される。したがって、価格は貨幣フローとエネルギーフローの整合性を測る指標として使える。本項以降では、エネルギーフローと貨幣フローの整合性を示すために、エネルギー価格について示す。

まず、原油、天然ガスの世界価格について見てみる。次の図 5.13、図 5.14 は、原油、天然ガスの本研究推計値の世界価格と各種統計によるスポット価格、世界価格を比較したものである。ここで本研究推計値の世界価格とは、世界全体の輸出総額を輸出総量で除したものをさす。

まず原油について見ると、統計間でのスポット価格や平均価格のばらつきが小さく、本研究推計値もそれらの値と同じような値を示していることがわかる。

一方、天然ガスについて見ると、統計間でばらつきが大きい。本研究推計値と乖離しているものもいくつか見られるが、本研究の推計値は中間的な値をとっており比較的妥当な推移をしていると考えられる。本研究と最も近い値を示したのは貿易統計の UN(2006)とエネルギー統計の IEA(2007a, b)から作成した世界価格である。本研究は、これら 2 つの統計を推計に使用したため、同じような傾向を示したと考えられる。天然ガスの価格は、国によってその決まり方が異なり、原油との一定比率で決まっていたり、アメリカのように輸入価格と国内価格とを連動させたりといった操作が行われている。このことが、スポット価格のばらつきを生む原因の一つとなっていると考えられる。

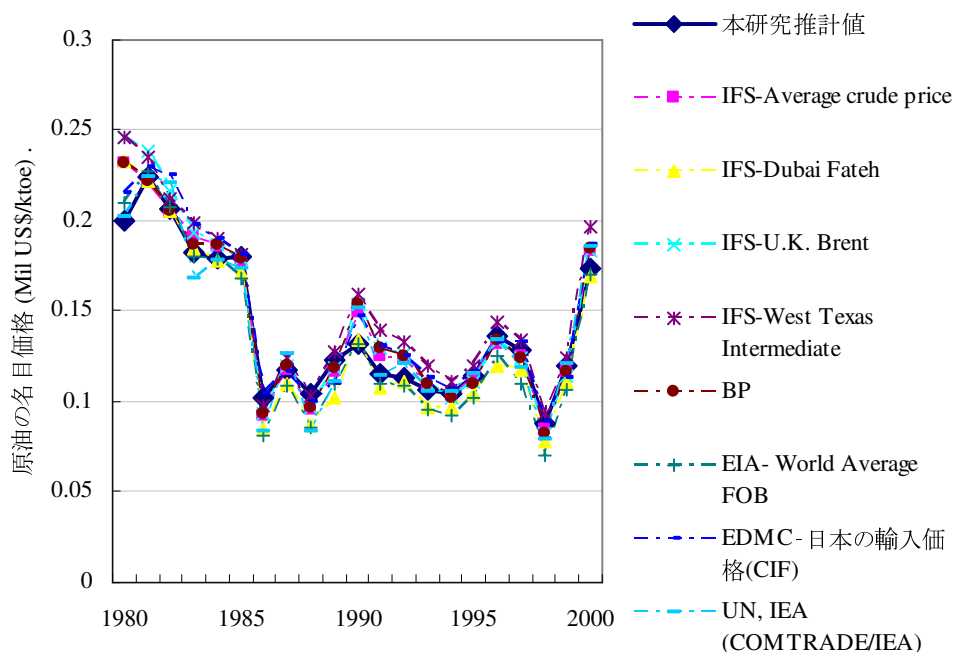


図 5.13 原油価格の比較

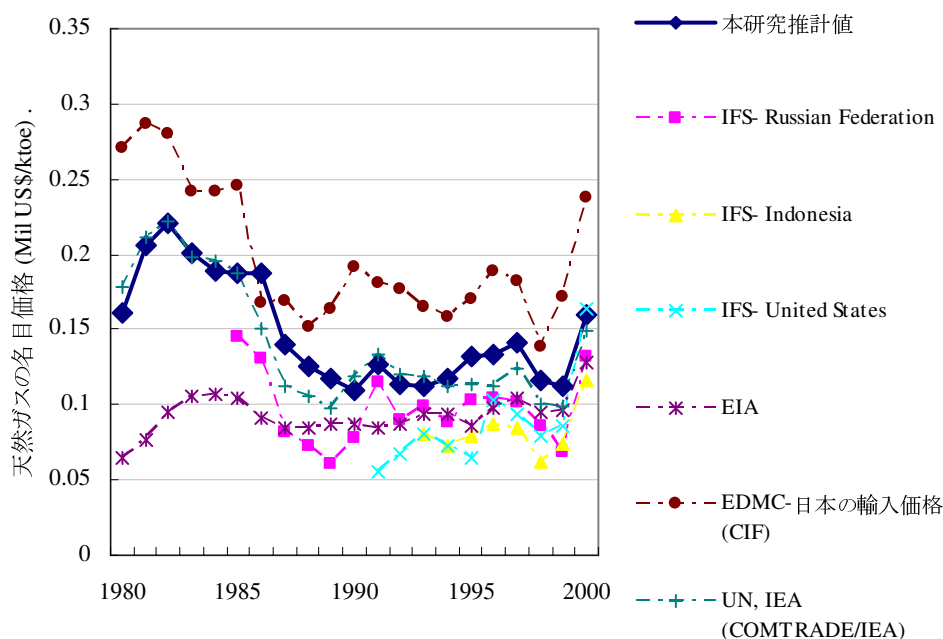


図 5.14 天然ガス価格の比較

### 5.5.6 国別の価格の比較

次に 2000 年における原油の輸入価格を国別に比較する。比較対象は、IEA、enerdata、UN と本研究推計値の原油の輸入価格である。ただし、IEA、enerdata、UN は金額データを保有していないため、貿易統計(UN, 2006)の金額データを各統計のエネルギー量で割った値をそれぞれの価格とした。また、IFS(IMF, 2007b)の原油平均価格を併せて示した。それぞれの平均価格、分散、最大値、最小値、レコード数(国数)、上側、下側 10%の範囲に入っている値を表 5.8 に示した。ここで、平均価格とは、世界の輸入総額を輸入総量で割った値である。

平均価格や中央値は統計間で大きな差は見られなく、概ね IFS の世界平均価格に近い。一方、分散、最大値、最小値や上側 10%、下側 10%の値を見ると、本研究の価格のばらつきが小さいことがわかる。本研究推計値の下側 10%は 0.14(mil\$/ktoe)であるが、IEA、enerdata、UN がそれぞれ 0.10(mil\$/ktoe)、0.11(mil\$/ktoe)、0.12(mil\$/ktoe)となり、平均価格 0.17(mil\$/ktoe)付近から離れていることがわかる。また他の統計の最小値に見られるような異常な値、例えば IEA の  $3.62 \times 10^{-8}$ (mil\$/ktoe)のような値も修正されていることがわかる。

以上より本研究推計値の価格のばらつきは既存の統計から小さくなったと考えられる。

表 5.8 2000 年の原油の輸入価格の比較  
(価格の単位は mil\$/ktoe で名目価格)

	平均値	中央値	分散	下側 10%	上側 10%	最大値	最小値
本研究 推計値	0.173	0.184	0.044	0.14	0.21	0.43	0.02
IEA	0.178	0.190	0.068	0.10	0.22	0.56	3.62*10 <sup>-8</sup>
enerdata	0.182	0.191	0.066	0.11	0.22	0.56	6.30*10 <sup>-8</sup>
UN	0.190	0.196	0.066	0.12	0.24	0.57	1.68*10 <sup>-6</sup>
IFS	0.167						

### 5.5.7 貿易価格に関する考察

国別の各エネルギー財の価格を経年変化で見たときに、大きなジャンプがあるようなデータはその信頼性に疑問の余地が残る。そこで、本項では、価格の経年変化が既存の統計と比べて、妥当な推移をしていることを示す。

国別の価格の経年変化を示すために、推計結果を以下の回帰モデルで整理した。

$$\ln_{10} P_{i,o,r,t} = \ln_{10} WP_{i,t} + \ln_{10} PI_{i,o,r} + rsd_{i,o,r,t} \quad (5.55)$$

ここで、

$P_{i,o,r,t}$ : 燃料  $i$ 、主体  $o$ (輸出と輸入)、国  $r$ 、年  $t$  の価格

$WP_{i,t}$ : 燃料  $i$ 、年  $t$  の世界貿易価格(fob)

$PI_{i,o,r}$ : 燃料  $i$ 、主体  $o$ (輸出と輸入)、国  $r$  の価格水準

$rsd_{i,o,r,t}$ : 残渣項

式(5.55)は以下のような意味を持つ。それは、各国の各財の価格  $P_{i,o,r,t}$  は世界価格  $WP_{i,t}$  にある一定比率  $PI_{i,o,r}$  を乗じたものに当てはまるが、年によってその一定比率から離れてばらつくものが残渣項  $rsd_{i,o,r,t}$  に吸収されるというものである。従って、残渣項が大きいほど世界価格の変動と異なる動きをしていることを意味する。

また、同じ回帰モデルを貿易統計とエネルギー統計(IEA)から計算したエネルギー価格についても適用し、それと比較した。図 5.15、図 5.16 はそれぞれ本研究推計値と 2 つの統計における、原油と石炭の輸出入価格を式(5.55)の回帰モデルに当てはめたときの残渣項の 90%区間、50%区間、中央値を示したものである。両図ともに左は本研究推計値、右は統計値を示す。ただし、左右の図の縦軸のスケールは異なる。

まず原油について見てみる。統計値、本研究推計値ともに 50%区間は非常に小さい範囲に収まっているが、90%区間で大きな差が見られる。本研究は-0.15 から 0.1 程度の範囲であるのに対して、統計値は-2.5 から 1.5 程度の値の範囲となった。同様の傾向が石炭についても見られる。本研究の 90%区間が-0.3 から 0.15 であるのに対して、統計値は-1 から 1.5 の範囲となっている。従って、本研究の推計値は、統計値と比べて、世界価格の変動と異なる価格変動をする国が少なくなっていることがわかる。

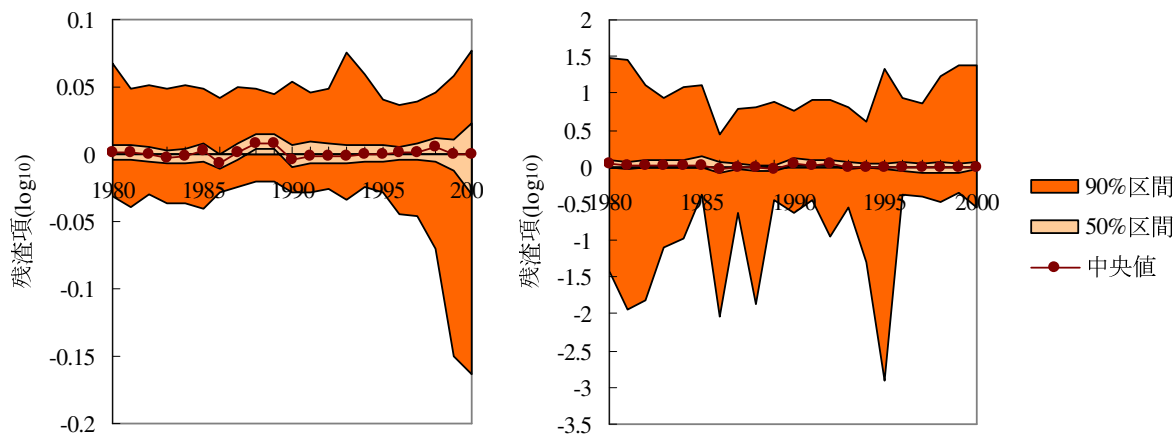


図 5.15 本研究と統計における原油の価格の残差項のばらつき

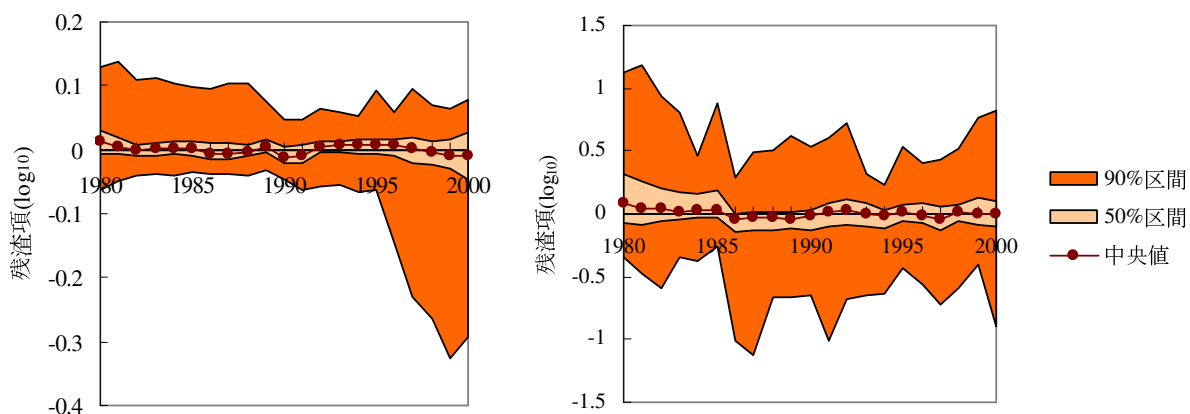


図 5.16 本研究と統計における石炭の価格の残差項のばらつき

## 5.6 おわりに

本研究では、様々な経済統計とエネルギー統計を統合的に用い、貨幣フローとエネルギーフローを同時に推計する手法を提案し、それを世界全域の1980年から2000年に適用した。その結果既存の統計と比べて、より尤もらしいデータが作成された。本研究推計値の国別の国内エネルギー消費量はおおむね既存の統計と一致するものの、一部の国は統計値から乖離した。その乖離は以下の要因による。すなわち、複数のエネルギー統計の中間的な値をとったこと、エネルギー統計の欠測が補完されたこと、エネルギー統計における統計不突合を解消したことである。また、世界価格はいくつかのスポット価格の中間的な値を取り、価格のばらつき度合いも既存の統計と比べて減少した。以上のようなエネルギーデータを基にCO<sub>2</sub>排出量を推計したところ、他研究の推計値と概ね一致するものの、一部の国で異なる値を示した。その原因は、使用しているエネルギー統計にあると考えられたが、原因が明らかでないものも含まれ、他の推計値の中には疑問の余地があるものも含まれた。

## 参考文献

- [1] Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Jepma, W.A. Pizer, K. Yamaji(2007): Mitigation from a cross-sectoral perspective. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [2] BP(British Petroleum)(2007): Statistical Review of World Energy, BP.
- [3] Census and Statistics Department Hong Kong Special Administrative Region(2007): Hong Kong's Merchandise Trade Statistics.
- [4] Dimaranan, Betina V.(2006): Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 6 Data Base, Center for Global Trade Analysis, Purdue University.
- [5] EIA(Energy Information Administration)(2007): Energy Statistics, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA.
- [6] Enerdata(2006): Globalstat, Enerdata, Grenoble, France.
- [7] Enerdata(2007): Emissionstat, Enerdata, Grenoble, France.
- [8] 藤森真一郎, 梶井洋志, 松岡譲(2007): 全世界における鉄のフローに関する研究, *環境システム研究論文集*, **35**, 343-354.
- [9] Fujimori, S. and Y. Matsuoka(2007b): Development of Global Trade Database: Method and Application, *Economic Systems Research* (Submitted).
- [10] 藤森真一郎, 諏訪亮一, 河瀬玲奈, 松岡譲(2005): 全世界の人間活動に伴う炭素フローの推計手法の開発に関する研究, *環境システム研究論文集*, **33**, 149-158.
- [11] FAO(2005): FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- [12] Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka(2003): Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. Multigas Mitigation and Climate Policy. *The Energy Journal Special Issue*.
- [13] Golan, A., G. Judge, and D. Miller(1996): Maximum Entropy Econometrics: Robust Estimation with Limited Data, John Wiley & Sons Ltd, England.
- [14] IDE(Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization) (2006): Asian international Input-Output table 2000, Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization Japan.
- [15] IDE(Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization) (2001): Asian international Input-Output table 1995, Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization Japan.
- [16] IDE(Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization) (1998): Asian international Input-Output table 1990, Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization Japan.



- [17]IDE(Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization) (1992): Asian international Input-Output table 1985, Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization Japan.
- [18]IDE(Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization) (1982): ASEAN international Input-Output table 1975, Institute of Developing Economics Japan External Trade Organization Japan.
- [19]IEA(International Energy Agency) (2007a): Energy Balance of OECD countries, International Energy Agency, Paris, France.
- [20]IEA(International Energy Agency) (2007b): Energy Balance of non-OECD countries, International Energy Agency, Paris, France.
- [21]IEA(International Energy Agency) (2007c): CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion, International Energy Agency, Paris, France.
- [22]IMF(International Monetary Fund) (2007a): Balance of Payments, International Monetary Fund, Washington, DC, USA.
- [23]IMF(International Monetary Fund) (2007b): IFS (International Financial Statistics), International Monetary Fund, Washington, DC, USA.
- [24]IPCC(2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K (eds). Published IGES, Japan.
- [25]IPCC(2007): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [26]川端康治, 渡辺利夫(2001): アジア長期経済統計-工業発展-,拓殖大学アジア情報センター.
- [27]Marland, G., T.A. Boden, and R.J. Andres(2006): Global, Regional, and National Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. Mastrandrea, M.D., and S.H..
- [28]Mitchell(2003): International Historical Statistics, Maxmillan Publishers Ltd.
- [29]National Statistics Republic of China(2007): 台湾国民経済計算,
- [30](<http://eng.stat.gov.tw/mp.asp?mp=5>).
- [31]日本エネルギー経済研究所(2007): エネルギー経済統計要覧(EDMC), 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット、省エネルギーセンター.
- [32]OECD(Organization for Economic Co-operation and Development) (1995): Input-Output Tables (1995 edition), Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- [33]OECD(Organization for Economic Co-operation and Development) (2002): Input-Output Tables (2002 edition), Organization for Economic Co-operation and Development, Paris,

France.

- [34]OECD(Organization for Economic Co-operation and Development) (2003): Structural Statistics for Industry and Services, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- [35]OECD(2003): The OECD STAN database for Industrial Analysis, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France..
- [36]OECD(Organization for Economic Co-operation and Development) (2005): International Trade by Commodity statistics, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- [37]OECD(Organization for Economic Co-operation and Development) (2006a): Input-Output Tables (2006 edition), Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- [38]OECD(Organization for Economic Co-operation and Development) (2006b): OECD Statistics on International Trade in Services, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- [39]Olivier, J.G.J., J.A. Van Aardenne, F. Dentener, V. Pagliari, L.N. Ganzeveld, and J.A.H.W. Peters (2005): Recent trends in global greenhouse gas emissions: regional trends 1970-2000 and spatial distribution of key sources in 2000. *Environmental Science*, 2(2-3), 81-99. DOI:10.1080/15693430500400345. <[http://www.mnp.nl/edgar/global\\_overview/](http://www.mnp.nl/edgar/global_overview/)>
- [40]Rao, S., K. Riahi(2006): The Role of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases in climate change mitigation: long-term scenarios for the 21st century. Multigas Mitigation and Climate Policy. *The Energy Journal Special Issue*.
- [41]Slavic Research Center: Soviet Economic Statistical Series(1996) (<http://src-h.slav.hokudai.ac.jp/originaldb.html>).
- [42]Smith, Steven J., and T.M.L. Wigley(2006): Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM Multigas Mitigation and Climate Policy. *The Energy Journal Special Issue*.
- [43]Steinberg, D. (1990): The Soviet Economy 1970-1990 A Statistical Analysis, International Trade Press.
- [44]UN(United Nations) (2003): Handbook of National Accounting, National Accounts: A practical introduction, Studies in Methods, United Nations, New York.
- [45]UN(United Nations) (2004): General Industrial Statistics Database, United Nations, New York, USA.
- [46]UN(United Nations) (2006a): National Accounts Statistics Database: Main Aggregates and Detailed Tables, United Nations, New York, USA.
- [47]UN (United Nations) (2006b): United Nations Commodity Trade Statistics Database, United Nations, New York, USA.
- [48]UN (United Nations) (2007): Energy Statistics database, United Nations, New York, USA.
- [49]UNIDO(United Nations Industrial Development Organization) (2006a): Industrial Demand-Supply Balance Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev2), United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Vienna, Austria.

- [50] UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) (2006b): Industrial Demand-Supply Balance Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev3), United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Vienna, Austria.
- [51] UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) (2006c): Industrial Statistics Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev2), United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Vienna, Austria.
- [52] UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) (2006d): Industrial Statistics Database at the 4-digit level of ISIC code (Rev3), United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Vienna, Austria.
- [53] World Bank (2006): World Development Indicators 2006, World Bank, Washington, DC.

## 付録 A 社会会計表の例

附図 5.1 2000 年の日本の社会会計表 (milUS\$ US\$)

[illegible]

## 付録 B 調整計算に用いる変数と集合一覧

### (1) 文字式一覧

#### 1) 地域内調整計算

##### ・ 未知変数

##### 貨幣フロー

$x_{i,j}$ : 行の要素  $i$  から列の要素  $j$  への投入の推計値

$q_{i,j}$ : 推計値の列計に対する各要素  $i$  の投入割合

$y_j$ : 推計値の列  $j$  における列計

##### 変数間割合など

$qg_j^{“go”}$ : GDP に対する生産要素の割合

$qg_j^{“ge”}$ : GDP に対する消費の割合

$qt_{i,“xtax”}$ : 輸出額に対する輸出税率

$qt_{i,“mtax”}$ : 輸入額に対する輸入税率

$qt_{i,“itp”}$ : 輸入額に対する輸送マージン率

$qs_j^{“so”}$ : 各産業の生産額の国全体に占める各部門  $j$  のシェア

$qs_j^{“va”}$ : 各産業の付加価値額の国全体に占める各部門  $j$  のシェア

$qs_j^{“la”}$ : 各産業の賃金の国全体に占める各部門  $j$  のシェア

##### エネルギーフロー

$m_{i,j}$ : 財  $i$  の部門  $j$  へのエネルギー投入フロー、もしくは財  $j$  の部門  $i$  への産出フロー

##### 価格

$pr_{i,j}$ : エネルギー価格でそれぞれの  $i, j$  に応じた価格

$pav_i^{“pro”}$ : 財  $i$  の生産価格

$pav_i^{“exp”}$ : 財  $i$  の輸出価格

$pav_i^{“imp”}$ : 財  $i$  の輸入価格

$pav_i^{“dom”}$ : 財  $i$  の国内消費平均価格

$paj_{i,j}$ : 財  $i$  の部門  $j$  への投入価格

##### 観測値との乖離や価格の乖離など表す変数

$e_{is}^{(k)}$ : 統計  $s$ 、情報種  $k_I$  の推計値と統計情報の乖離割合

$eg_j^{(f_1)}$ : GDP に対する各要素と基準マトリクスとの乖離割合

$et_{i,j}$ : 基準マトリクスの輸出税率、輸入税率、輸送マージン率と推計値の輸出税率、輸入税率、輸送マージン率との乖離割合

$em_s^{(k_2)}$ : 統計情報  $\overline{d_{2s}^{(k_2)}}$  の誤差

$e_{4i}^{exp}$ : 財  $i$  の生産価格と輸出価格の乖離

$e_{4i}^{imp}$ : 財  $i$  の輸入価格と国内消費平均価格の乖離

$ep_{2i,j}$ : 国内消費平均価格と部門  $j$  における消費価格の乖離割合

$w_{1s}^{(k_1)}$ : 統計情報の乖離に対する確率密度で、0 から 1 までの値をとる。

$w_{2j}^{(f_1)}$ : GDP に対する各要素と基準マトリクスとの乖離割合  $eg_j^{(f_1)}$  の確率密度

$w_{3i,j}$ : 乖離割合  $et_{i,j}$  に対する確率密度

$w_{4s}^{(k_2)}$ : 乖離割合  $em_s^{(k_2)}$  に対する確率密度

$wp_{1i}^{(f_3)}$ : 価格の乖離割合  $ep_{1i}^{(f_3)}$  に対する確率密度

$wp_{2i,j}$ : 価格の乖離割合  $ep_{2i,j}$  に対する確率密度

## ・ 既知変数

### 基準マトリクスに関連する変数

$\overline{\xi_{i,j}}$ : 列の要素  $j$  における行の要素  $i$  の投入を表す基準マトリクス

$\overline{\theta_{i,j}}$ : 基準マトリクスの列計に対する各要素  $i$  の投入割合

$\overline{\psi_j}$ : 基準マトリクスの列  $j$  における列計

$\overline{\phi_j^{go}}$ : 基準マトリクスにおける GDP に対する生産要素の割合

$\overline{\phi_j^{ge}}$ : 基準マトリクスにおける GDP に対する消費の割合

$\overline{\pi_{i, \text{max}}}$ : 基準マトリクスにおける輸出額に対する輸出税率

$\overline{\pi_{i, \text{max}}}$ : 基準マトリクスにおける輸入額に対する輸入税率

$\overline{\pi_{i, \text{imp}}}$ : 基準マトリクスにおける輸入額に対する輸送マージン率

$\overline{\sigma_j^{so}}$ : 基準マトリクスにおける各産業の生産額の国全体に占める各部門  $j$  のシェア

$\overline{\sigma_j^{va}}$ : 基準マトリクスにおける各産業の付加価値額の国全体に占める各部門  $j$  のシェア

$\overline{\sigma_j^{la}}$ : 基準マトリクスにおける各産業の賃金の国全体に占める各部門  $j$  のシェア

#### 貨幣フローの観測値に関連する変数

$\overline{d_{1s}^{(k_1)}}$ : ある  $i, j$  について得られる統計  $s$  の情報  $k_1$

$\overline{g_{1i,j}^{(k_1)}}$ : 情報種  $k_1$  に対応するセルには 1、それ以外にはゼロが入っている設定変数

**GDP: GDP**

#### エネルギーフロー観測値に関連する変数

$\overline{d_{2s}^{(k_2)}}$ : あるエネルギー量  $m_{i,j}$  に対する情報

$\overline{g_{2i,j}^{(k_2)}}$ : 情報種  $k_2$  に対応するセルには 1、それ以外にはゼロが入っている設定変数

#### 設定変数

$\overline{v_{1s}^{(k_1)}}$ : 乖離割合  $e_{1s}^{(k_1)}$  の値の範囲となる。

$\overline{v_{2j}^{(f_1)}}$ : 誤差  $eg_j^{(f_1)}$  の値の範囲

$\overline{v_{3i,j}}$ : 誤差  $et_{i,j}$  の値の範囲

$\overline{v_{4s}^{(k_2)}}$ : 誤差  $em_s^{(k_2)}$  の値の範囲

$\overline{vp_{1i}^{(f_3)}}$ :  $ep_{1i}^{(f_3)}$  の値の範囲

$\overline{vp_{2i,j}}$ :  $ep_{2i,j}$  の値の範囲

$\overline{\gamma_{1s}^{(k_1)}}$ : 統計  $s$ 、情報種  $k_1$  の重み

$\overline{\gamma_{2j}^{(f_1)}}$ : 重みを表す係数

$\overline{\gamma_{3i,j}}$ : 重みを表す係数

$\overline{\gamma_{4j}^{(f_2)}}$  : 重みを表す係数

$\overline{\gamma_{5s}^{(k_2)}}$  : 重みを表す係数

$\overline{\gamma_{6i}^{(f_3)}}$  : 重みを表す係数

$\overline{\gamma_{7i,j}}$  : 重みを表す係数

## 2) 貿易収支調整計算

### ・未知変数

#### 貨幣フロー

$EX_{i,r}$ : 国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸出額

$EM_{i,r}$ : 国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸入額

#### エネルギーフロー

$MX_{i,r}$ : 国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸出量

$MM_{i,r}$ : 国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸入量

#### 価格

$PX_{i,r}$ : 国  $r$ 、エネルギー財  $i$  の輸出価格(fob)

$PM_{i,r}$ : 国  $r$ 、エネルギー財  $i$  の輸入価格(fob)

$WP_i$ : エネルギー財  $i$  の世界平均価格(fob)

#### 観測値との乖離や価格の乖離など表す変数

$c_{i,r}^{exp}$ : 国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸出額の地域内調整計算の推計値と貿易収支計算の推計値の乖離割合

$c_{i,r}^{imp}$ : 国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸入額の地域内調整計算の推計値と貿易収支計算の推計値の乖離割合

$mc_{i,r}^{exp}$ : 国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸出量の地域内調整計算の推計値と貿易収支計算の推計値の乖離割合

$mc_{i,r}^{imp}$ : 国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸入量の地域内調整計算の推計値と貿易収支計算の推計値の乖離割合

$pc_{i,r}^{exp}$ : 国  $r$  のエネルギー財  $i$  の輸出価格と世界平均価格との比

$pc_{i,r}^{imp}$ : 国  $r$  のエネルギー財  $i$  の輸入価格と世界平均価格との比

$wc_{i,r}^{(f3)}$ : 乖離割合  $c_{i,r}^{(f3)}$  に対する確率密度

$wmc_{i,r}^{(f3)}$ : 乖離割合  $mc_{i,r}^{(f3)}$  に対する確率密度

$wpc_{i,r}^{(f3)}$ : 乖離割合  $pc_{i,r}^{(f3)}$  に対する確率密度



## ・既知変数

### 貨幣フロー観測値

$\overline{REX}_{i,r}$  : 地域内調整計算の推計値の国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸出額

$\overline{REM}_{i,r}$  : 地域内調整計算の推計値の国  $r$  の財・サービス  $i$  の輸入額

$\overline{RMX}_{i,r}$  : 地域内調整計算の推計値の国  $r$  の財  $i$  の輸出量

$\overline{RMM}_{i,r}$  : 地域内調整計算の推計値の国  $r$  の財  $i$  の輸入量

### 設定変数

$\overline{vc}_{i,r}^{(f_3)}$  : 乖離  $c_{i,r}^{(f_3)}$  の値の範囲

$\overline{vmc}_{i,r}^{(f_3)}$  : 乖離  $mc_{i,r}^{(f_3)}$  の値の範囲

$\overline{vpc}_{i,r}^{(f_3)}$  : 乖離  $pc_{i,r}^{(f_3)}$  の値の範囲

$\overline{\gamma c}_{i,r}^{(f_1)}$  : 重みを表す設定変数

$\overline{\gamma mc}_{i,r}^{(f_1)}$  : 重みを表す設定変数

$\overline{\gamma pc}_{i,r}^{(f_1)}$  : 重みを表す設定変数

## (2) 集合一覧

$i \in I$  : 行の集合

$j \in J$  : 列の集合

$f_1 \in F_1$  : 生産側の要素、賃金、資本減耗、土地、税金、補助金(GDP の生産要素)、家計消費、政府消費、資本形成、輸出、輸入(GDP の消費要素)を持つ集合

$f_2 \in F_2$  : 生産、付加価値、賃金を要素として集合

$k_1 \in K_1$  : 貨幣フローの情報種  $k_I$

$j \in J_{go}$  : GDP の生産要素の集合

$j \in J_{ge}$  : GDP の消費要素の集合

$j \in J_p$  : 生産活動の集合

$i \in I_{ca}$  : 付加価値の要素集合

$i \in I_c$  : 財・サービスの集合

$i \in I_{gd}$  : 財の集合

$i \in I_e$  : エネルギー財の集合

$j \in J_e$  : エネルギー財を生産する部門の集合

$j \in J_{dom}$ : 国内部門、すなわち生産活動と消費活動の集合  
 $j \in J_{trdtax}$ : 輸出税、輸入税、輸送マージンを要素に持つ集合  
 $j \in J_{gdp}$ : GDP の生産と消費の要素を表す集合である。  
 $f_3 \in F_3$ : 輸出、輸入を要素にもつ集合  
 $r \in R$ : 国の集合

## 第6章 エネルギー産出投入表の構築

本章では、エネルギー産出投入表の構築について示す。現在、世界全域をカバーしたエネルギー統計の中でも IEA の Energy Balance(IEA, 2007a、2007b)は最も有用なものとして多くの研究に用いられている。しかし、この Energy Balance には少なくとも 3 種類の問題がある。すなわち(1)エネルギー転換効率が 1 を越えるものが含まれる、(2)時系列変化を見たときに、不適切と思われるものが含まれる、(3)欠測がある。そこで本研究では、その問題点を修正、調整する方法を提案し、実際にその方法を適用し、結果について検討する。推計は 1 年ずつ、地域別で行い、Cross-Entropy 法を用いて推計を行った。

その結果、前述の統計の問題は解消された。最終エネルギー消費量で見ると、カナダ、その他アフリカ、韓国、メキシコ、中東で IEA と推計値との乖離が大きかった。発電プラント、発電熱プラントのエネルギー転換効率について見ると IEA では、石油の発電プラント、天然ガスの発電熱プラントで物理的上限を突破している数が多かった。また、部門別で比較すると石油精製部門で修正が大きかった。国別で見た場合は、途上国のアフリカ地域やその他世界といった地域で修正が大きかったが、OECD 諸国の中でもオーストラリア、カナダなどでいくつかの国では修正量が大きかった。

### 6.1 はじめに

ポスト京都議定書の策定へ向けて、国別の排出量の割り当て方法などが議論されている。そういった議論の中で、世界全体の温室効果ガスの排出許容量、各国の温室効果ガス排出量の見通し、温室効果ガス排出の削減可能量・削減コスト、対策の効果といった情報は重要な役割を担う。

人為起源の温室効果ガスの中でも最も排出量が多いのはエネルギー用途の化石燃料起源の二酸化炭素排出である。上記の議論を行う上で、今後数十年から百年程度の間、人間活動により生産消費される化石燃料や再生可能エネルギー需給の情報は欠かすことができないといってもよいだろう。こういった情報は社会経済活動やその活動とエネルギー需給との関係などを記述するシミュレーションモデルによって得られる。実際にこれまで多くの研究チームがそのようなモデルを用いて推計を行ってきた。そのシミュレーションを行うためには世界全域をカバーし、かつ信頼できるエネルギー統計が必要となる。また、部門別の排出可能量、コストの算定を行うためには、前述のエネルギー統計は、部門別のエネルギー消費量といった詳細な情報も持っていることが求められる。

現在、世界全域をカバーしたエネルギー統計は、IEA の Energy Balance(IEA, 2007a、2007b)、Enerdata の Globalstat(Enerdata, 2008)、EIA、BP のエネルギー統計(EIA,2007; BP2007)などがある。このうち、EIA と BP のエネルギー統計は、化石燃料、電力、再生可能エネルギーの生産量と輸出入量程度しかカバーしておらず、エネルギー転換の過程や部門別の最終エネルギー消費量に関するデータを収録していない。そのため、これらのエネルギー統計から、部門別の情報、すなわち部門別の温室効果ガス排出量やその削減可能量を示すことは困難である。一方、IEA と enerdata のエネルギー統計は、各エネルギー源の生産、輸出入からエネルギー転換、部門別の最終エネルギー消費量が収録されているものの、少なくとも以下の 3 つの問題を抱えている。

- (1) エネルギー転換効率が 1 を越えるものが含まれる
- (2) 時系列変化を見たときに、不適切と思われるものが含まれる
- (3) 欠測がある

そこで本研究は、エネルギーフローを記述する勘定表を提案し、その勘定体系に基づきエネルギーデータの調整方法を示し、既存のエネルギー統計の抱える問題点を解消することを目的とする。本論文では主として(1)の問題に焦点を当てて結果を示す。

以下ではまず本研究で提案する勘定表について示す。そのために部門やエネルギー源を定義する。次にその勘定表に基づいたエネルギーフローの推計方法を示す。推計には Cross-entropy 法を用い、非線形計画問題として記述した。一般的な定式化を行い、次にそのモデルに適用するパラメータ等の説明をする。上記で示したエネルギー統計の問題のうち、(1)、(3)は変数の定義、制約条件を決めれば、必然的に解決する問題である。また、推計を一年ずつ順番に行い、そこで推計された値を次の年の推計に反映させることにより、問題の(2)を解決する。結果・考察では、既存の統計と推計値がどのような異なるのかということを中心に述べる。

## 6.2 定義と対象

### 6.2.1 部門、エネルギー源

本研究で対象とする物質・エネルギーは、化石燃料、水力、バイオマスなどの主要なエネルギー源であり、これを本論文中ではエネルギー源と呼ぶ。エネルギー源は 19 種類を扱う(表 6.1)。

表 6.1 エネルギー源一覧

Code	説明(日本語)	Description(English)
CCL	石炭	Coal
COP	石炭製品	Coal Products
CCK	コークス	Coke
BFS	溶鉱炉ガス	Blast Furnace gas
COG	コークス炉ガス	Coke oven gas
NGS	天然ガス	Natural Gas
CRU	原油	Crude Oil
OIL	石油製品	Oil Products
ELY	電力	Electricity
HET	熱	Heat
NUC	原子力	Nuclear
HYD	水力	Hydro
GEO	地熱	Geothermal
SPV	太陽光	Solar Photovoltaics
STH	太陽熱	Solar Thermal
TID	波力	Tidal
WIN	風力	Wind
TBI	バイオマス	Total biomass
ORN	その他再生可能エネルギー	Other Renewable

また、エネルギーの授受を行う、主体を部門と呼ぶ。部門は大別して、一次エネルギー供給、エネルギー転換、最終消費の 3 つに分けられる。これらを大部門と呼ぶ。それぞれの大部門は、さらに細かい中部門に分類され、一次エネルギー供給は生産、国外貿易、在

庫増減の3種類、エネルギー転換はエネルギー転換活動、自家消費活動、エネルギー分配ロスの3種類、最終消費は産業、交通、その他、非エネルギー利用の4種類に分かれる。ここで、エネルギー転換部門の中部門は主体ベースではなくアクティビティベースの分類とした。また、中部門のうち、エネルギー転換活動、自家消費活動、産業、交通、その他は、小部門を持ち、エネルギー転換活動は29の活動、自家消費活動は9の活動、産業は13、交通は6、その他は3の部門に分かれる。これらの部門の一覧を表6.2に示す。

表 6.2 部門一覧

大分類	中分類	コード	小分類	Description(English)		
一次エネルギー供給	生産	EXT		Extraction of Energy sources		
	国外貿易	FOR		Trade		
	在庫増減	STC		Stock change		
エネルギー転換部門	エネルギー転換活動	E_SOL	石炭発電	Coal Electricity Power Plant		
		E_LIQ	石油発電	Oil Electricity Power Plant		
		E_GAS	ガス発電	Gas Electricity Power Plant		
		E_NUC	原子力発電	Nuclear Electricity Power Plant		
		E_HYD	水力発電	Hydropower Electricity Power Plant		
		E_GEO	地熱発電	Geothermal Electricity Power Plant		
		E_SPV	太陽光発電	Solar Photovoltaics Electricity Power Plant		
		E_STH	太陽熱発電	Solar Thermal Electricity Power Plant		
		E_TID	波力発電	Tidal Electricity Power Plant		
		E_WIN	風力発電	Wind Electricity Power Plant		
		E_ORN	その他再生可能エネルギー発電	Other Renewable Electricity Power Plant		
		C_SOL	石炭CHP発電	Coal CHP Plant		
		C_LIQ	石油CHP発電	Oil CHP Plant		
		C_GAS	ガスCHP発電	Gas CHP Plant		
		C_NUC	原子力CHP発電	Nuclear CHP Plant		
		C_GEO	地熱CHP発電	Geothermal CHP Plant		
		C_STH	太陽熱CHP発電	Solar Thermal CHP Plant		
		C_ORN	その他再生可能エネルギーCHP発電	Other Renewable energy CHP Plant		
		H_SOL	石炭熱供給プラント発熱	Coal Heat Plants		
		H_LIQ	石油熱供給プラント発熱	Oil Heat Plants		
		H_GAS	ガス熱供給プラント発熱	Gas Heat Plants		
		H_GEO	地熱供給プラント発熱	Geothermal Heat Plants		
		H_STH	太陽熱供給プラント発熱	Solar Thermal Heat Plants		
		H_ORN	その他再生可能エネルギー熱供給プラント発熱	Other Renewable energy Heat Plants		
	自家消費活動	CCK	コークス製造	Coke Ovens		
		CTR	石炭転換	Coal Transformation		
		RFS	原料生成	Refinery feedstocks		
		OTS	その他転換	Other Transformation		
		BLF	高炉転換	Blast Furnace		
		UEH	プラント自家消費	Own Use in Plants		
		UCK	コークス炉自家消費	Own Use in Coke Ovens		
		UBL	高炉自家消費	Own Use in Blast Furnace		
		UCT	石炭転換自家消費	Own Use in Coal Transformation		
		UPR	石油精製自家消費	Own Use in Refinery		
	エネルギー分配ロス	UGW	ガス供給自家消費	Own Use in Gas Work		
		UOT	その他エネルギー転換自家消費	Own Use in Other Transformation		
		CLM	石炭採掘	Coal Mining		
		OGE	石油・天然ガス採掘	Oil and Gas Extraction		
	エネルギー分配ロス				DSL	Energy distribution Loss
	最終消費部門	TFC			最終消費計	Total Final Consumption
		産業	TIN	産業計	Total Industry	
			I_S	鉄鋼	Iron and Steel	
			CRP	化学	Chemical and petrochemical	
			NFM	非鉄金属	Non-ferrous metals	
			NMM	非金属	Non-metallic and minerals	
			MCH	機械	Machinery	
FPR			輸送機器	Transport equipment		
PPP			紙パルプ	Paper, pulp and print		
OMN			鉱業	Mining and quarrying		
TEX			繊維	Textile and leather		
FPR			食料	Food and tobacco		
LUM			木材	wood and wood products		
CNS			建設	consutruction		
XIN			その他	Other industry		
交通		TTR	交通計	Total Transportation		
		RD	道路	Road		
		RL	鉄道	Rail		
		NVDM	内航船舶	Domestic navigation		
		NVIT	国際船舶	International navigation		
		ARDM	国内航空	Domestic aviation		
		ARIT	国際航空	International aviation		
その他		TOR	その他計	Total Other Sectors		
		RSD	家庭	Residential		
		SER	業務	Comercial and pulic service		
		AGR	農業	Agriculture		
非エネルギー利用		TNE	非エネルギー利用	Non-energy use		

## 6.2.2 勘定表の枠組み

本研究ではエネルギーの投入と産出を表す、エネルギー投入産出勘定表を作成する。ここでは、その概要を表した簡略版の勘定表を示す。実際に用いる詳細は巻末の表を参照されたい。

本研究ではエネルギーの投入と産出を表す、エネルギー投入産出勘定表を作成する。ここでは、その概要を表した簡略版の勘定表を表 6.3 に示す。実際に用いる詳細は巻末の表を参照されたい。

表 6.3 エネルギー投入産出表の枠組み

大分類	中分類	コード	一次エネルギー供給			エネルギー転換部門			最終消費部門				エネルギー源										消費・損失 エネルギー	
			生産	国外	在庫 増減	エネルギー 転換活動	自家 消費活動	エネルギー 分配ロス	産業	交通	その他	非エネルギー 利用												
			EXT	FOR	STC	TTF	TOU	TDL	TIN	TTR	TOR	TNE	COL	NGS	CRU	OIL	ELY	HET	NUC	HYD	ORN	TFL		
一次エネルギー供給	生産	EXT																						
	国外	FOR																						
	在庫増減	STC																						
エネルギー転換部門	エネルギー 転換活動	TTF																						
	自家 消費活動	TOU																						
	エネルギー 分配ロス	TDL																						
最終消費部門	産業	TIN																						
	交通	TTR																						
	その他	TOR																						
	非エネルギー 利用	TNE																						
エネルギー源	石炭	COL	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○									
	天然ガス	NGS	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○									
	原油	CRU	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○									
	石油製品	OIL		○		○		○	○	○	○	○	○	○	○									
	電力	ELY		○				○	○	○	○	○	○	○	○									
	熱	HET						○	○	○	○	○	○	○	○									
	原子力	NUC	○			○				○	○	○	○	○	○									
	水力	HYD	○			○																		
	その他再生可能 エネルギー	ORN	○			○																		
	消費・損失エネルギー	TFL																						

行列ともに同じ項目を持ち、部門、エネルギー源で構成される。エネルギー源が部門から産出された場合、表中の右上部分に計上され、エネルギー源の部門への投入があった場合は左下の部分に計上される。

また、前節で定義していなかった消費・損失エネルギーという項目が一番右端列、行の一番下にあるが、これはエネルギー転換時のロス分、最終消費と自家消費に用いるエネルギー消費量を表すものである。

表中に○で示されている部分は値が入るところを表し、空白の部分は概念上値が入らないことを意味している。左下部分はエネルギー源が部門へ投入されるフローを表し、右上部分はエネルギー源が部門から産出されるフローを表す。

## 6.2.3 対象

本研究の対象を以下に示す。対象地域は全世界(106 地域(94 カ国+12 地域))であり、対象年は 1971-2005 年である。この地域区分は、2000 年において GDP が上位 99%以上の国を単一国とし、残りの国を地理的分布に従う集約地域とするという原則に基づいて決定した。地域の一覧は巻末の表に示す。

## 6.3 推計方法

### 6.3.1 統計の問題と推計の方針

6.1 節で述べたように、既存の統計には、以下の 3 つの問題がある。

- (1) エネルギー転換効率が 1 を越えるものが含まれる
- (2) 時系列変化を見たときに、不適切と思われるものが含まれる
- (3) 欠測がある

このうち、(1)と(3)は変数として定義し、制約条件を加えれば解決する。しかし、(2)についてはやや工夫が必要である。

そこで、本研究では以下の原則に従い、データの調整を行う。

- [1] Cross-entropy 法を用いて推計する。
- [2] 前節で示した勘定表と同構造の基準となるべきマトリクス(以降この表を基準マトリクスと呼ぶ)を決定する。
- [3] 推計値と基準マトリクスの乖離、統計などの各種の情報と推計値との乖離の 2 つの乖離を同時に最小化して推計値を決定する。これにより時系列変化が滑らかになる。
- [4] ここの各種情報として、以下の 2 種類を用いる。第一にエネルギー統計の情報、第二にエネルギー転換効率、エネルギー分配ロス率である。
- [5] 全エネルギー源の一次エネルギー供給量は誤差がない固定されるべき変数であるとする。

以下では、推計の方法を一般的な式を用いて示し、次いでその方法を実際に適用するときの方法と各種変数の設定について述べる。

### 6.3.2 基準マトリクスと推計値の関係

エネルギー投入産出勘定表の行の要素を  $i$ 、列の要素を  $j$  とし、推計値を  $x_{i,j}$  とする。ある列  $j$  の和を  $y_j$  とし、その和に対する要素  $x_{i,j}$  の割合を  $q_{i,j}$  とする。 $x_{i,j}$ 、 $y_j$ 、 $q_{i,j}$  は次の関係を満たす。

$$x_{i,j} = y_j \cdot q_{i,j} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (6.1)$$

ここで、 $I$  は行の集合、 $J$  は列の集合である。同様に、基準マトリクス  $\overline{\xi}_{i,j}$  が与えられたとして、基準マトリクスにおける列和  $\overline{\psi}_j$  が次の関係を満たすとする。

$$\overline{\xi}_{i,j} = \overline{\theta}_{i,j} \cdot \overline{\psi}_j \quad \forall j \in J \quad (6.2)$$

ここで、 $\overline{\theta}_{i,j}$  は基準マトリクスにおける  $j$  列の列和  $\overline{\psi}_j$  に対する各要素  $\overline{\xi}_{i,j}$  の割合を表す。

$q_{i,j}$  は Golan *et al.*(1996)で示される Cross-entropy 法を用いて以下のような目的関数を最小化し、決定する。

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} p_{i,j} \ln \frac{p_{i,j}}{\theta_{i,j}} \quad (6.3)$$

ここで、

$$\sum_i p_{i,j} = 1 \quad \text{and} \quad 0 \leq p_{i,j} \leq 1 \quad (6.4)$$

また、行の合計と列の合計が等しい、つまり、ある部門におけるエネルギーの投入と産出の総量、あるいはあるエネルギー源の投入量と産出量総量が等しいというエネルギー収支条件を加える。

$$\sum_i x_{i,j} = \sum_j x_{i,j} \cdot \overline{\mu_{i,j}} \quad \forall j \in J \quad (6.5)$$

ここで、 $\overline{\mu_{i,j}}$  は  $i$  と  $j$  が同じものに 1、それ以外にゼロを持つ行列である。

### 6.3.3 観測値と推計値の関係

次に、推計値  $x_{i,j}$  のある要素  $(i,j) \in IJ_K$  に対して、観測値  $\bar{b}_k$  が得られたとする。総一次エネルギー供給量に対する推計値と観測値  $\bar{b}_k$  は誤差の割合  $r_k$  を用いて以下の関係となる。

$$\frac{\bar{b}_k}{\bar{b}_0} = \frac{\left( \sum_j \sum_i x_{i,j} \overline{g_{i,j,k}} \right)}{\left( \sum_j \sum_i x_{i,j} \overline{g_{0i,j}} \right)} r_k \quad \forall k \in K_1 \quad (6.6)$$

ここで、 $\bar{b}_0$  は、マトリクス内で固定されるべき観測値(今回適用する場合は全エネルギー源の一次エネルギー供給量)を表す。集合  $K_1$  は、観測値の中でもエネルギーの投入量や産出量などの絶対量に関する情報を意味する(エネルギー転換効率など割合に関する情報はここには含まれない)。また、 $\overline{g_{i,j,k}}$  は観測値  $\bar{b}_k$  に対応する  $x_{i,j}$  の和を作る行列である。例えば、 $k=1$  のとき、観測値  $\bar{b}_k$  は  $x_{i,j}$  の中の  $j=1$  列の列和を表す観測値であったとする。すると、 $\overline{g_{i,j,k}}$  は以下ようになる。

$$\overline{g_{i,j,1}} = \begin{matrix} & j1 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.7)$$

同様に、 $\overline{g_{0i,j}}$  は観測値  $\bar{b}_0$  に対応する  $x_{i,j}$  の和を作る行列である。

観測値の中には、エネルギー転換効率などの推計値  $x_{i,j}$  間の比を表す情報も存在する。そのときは  $r_k$  は以下のように表される。



$$\bar{b}_k = \frac{\left( \sum_j \sum_i x_{i,j} \bar{g}_{i,j,k} \right)}{\left( \sum_j \sum_i x_{i,j} \bar{f}_{i,j,k} \right)} r_k \quad \forall k \in K_2 \quad (6.8)$$

ここで、集合  $K_2$  は推計値間の比に関する情報を持つ観測値の集合である。

観測値と推計値の比  $r_k$  の対数は次の式(6.9)を満たすある確率分布  $w_{k,h}$  とその重み  $\bar{v}_{k,h}$  の和で表されるとすると、 $r_k$  は式(6.10)のように表される。

$$\sum_h w_{k,h} = 1, \quad w_{k,h} > 0 \quad \forall k \in K \quad (6.9)$$

$$\ln r_k = \sum_h w_{k,h} \bar{v}_{k,h} \quad \forall k \in K \quad (6.10)$$

ここで、 $\bar{v}_{k,h}$  は、 $h=1$  のとき  $\bar{v}_{k,1} = \ln \bar{u}_k$ 、 $h=2$  のとき  $\bar{v}_{k,2} = -\ln \bar{u}_k$  の2つのみを設定した。 $\bar{u}_k$  の設定については後述する。集合  $K$  は  $K_1$  と  $K_2$  の和集合である。そして、以下の目的関数を最小化することで確率  $w_{k,h}$  を得る。

$$\sum_h w_{k,h} \ln \frac{w_{k,h}}{1/n} \quad (6.11)$$

ここで、 $n$  は  $h$  の要素数(ここでは2)を表す。既知の変数  $\bar{u}_k$  の対数をとる確率  $w_{k,h}$  が等しいときにこの関数は最小化され、そのとき観測値と推計値には乖離がないとなる。

### 6.3.4 制約条件の追加

前項までの式群に加えて、エネルギー転換活動におけるエネルギー転換効率の物理的上限を設定する。

$$\frac{\sum_i x_{i,j} - \sum_i x_{i, \text{"tfl"}} \cdot \bar{\mu}_{i,j}}{\sum_i x_{i,j}} \leq \bar{\tau}_j \quad \forall j \in J \quad (6.12)$$

ここで、 $\bar{\tau}_j$  はエネルギー転換活動  $j$  におけるエネルギー転換効率の物理的上限である。

左辺の分母はあるエネルギー転換活動  $j$  のエネルギー投入量であり、分子はあるエネルギー転換活動  $j$  におけるエネルギー源の産出量である。“tfl”はエネルギー転換ロスを表す。物理的上限は巻末に示すとおりである。

また、発電容量についても上限を設ける。

$$x_{i, \text{"ELY"}} \leq \Lambda_i \quad \forall i \in I_{\text{pow}} \quad (6.13)$$

ここで、集合  $I_{\text{pow}}$  は発電プラントの発電活動を表す。

### 6.3.5 目的関数

6.3.2 項、6.3.3.6.3.4 項、6.3.4 項で示した方法を同時に解く。そこで、式(6.3)と式(6.11)

の最小化する目的関数をあわせて最小化する。

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{i,j} \ln \frac{q_{i,j}}{\theta_{i,j}} + \sum_{k \in K} \bar{\gamma}_k \cdot \left[ \sum_{h \in H} w_{k,h} \ln \frac{w_{k,h}}{1/n} \right] \quad (6.14)$$

ここで、 $\bar{\gamma}_k$  は、観測値  $\bar{b}_k$  に対する重みである。

## 6.4 適用と各種設定

### 6.4.1 計算の手順と基準マトリクス

前節で示した問題を、各国、各年別に適用する。計算は各国 2005 年、2004 年、2003 年というように順番にさかのぼっていく。また、基準マトリクスは計算実行の年の後の年(2004 年の実行時には 2005 年)とし、推計されたものが次の計算の基準マトリクスとなるようにしていく。各国の計算の最初の年(一部分裂統合のあった国は異なるが、大部分の国は 2005 年)は、基準マトリクスとして、IEA の Energy Balance のデータから作成したものを用いた。

### 6.4.2 観測値

観測値には、IEA の Energy Balance(IEA, 2007a、2007b)、Enerdata の Globalstat(Enerdata, 2008)、EIA、BP のエネルギー統計(EIA,2007; BP2007)、藤森ら(2008)(第 5 章の推計結果)を用いた。

また上記の統計とは別にエネルギー転換効率、エネルギー分配ロス率、自家消費率を別途準備して、それらを適用した。エネルギー転換効率の設定方法は巻末に示す。エネルギー分配ロス率、自家消費率についてはデータを誤りとする客観的な基準を設けず、IEA の Energy Balance(IEA, 2007a、2007b)のデータから計算したものを用い、IEA の Energy Balance で欠測しているところは、世界平均で補った。

### 6.4.3 観測値の中で固定するもの

観測値のうち以下のものは誤差なしの観測値、つまり固定される変数として扱った。

- (1) 全エネルギー源の一次エネルギー供給量
- (2) 石炭、原油、天然ガスの生産輸出入量
- (3) 電力、石油精製品の輸出入量

このうち、(2)、(3)は藤森ら(2008)を適用した。(1)は石炭、原油、天然ガス、電力、石油精製品の一次エネルギー供給量は藤森ら(2008)を、それ以外のエネルギー源は前項で挙げた各種エネルギー統計の平均値を用いた。

### 6.4.4 変数 $\bar{u}_k$ の決め方

変数  $\bar{u}_k$  は  $r_k$  の動ける範囲、目的関数の勾配に寄与する。 $\bar{u}_k$  が大きい場合、目的関数の勾配は緩くなり、 $r_k$  は 1 から離れやすくなる。この  $\bar{u}_k$  は基準マトリクス  $\bar{\xi}_{i,j}$  と観測値との比

を用いて以下のように設定する。

$$\ln \bar{u}_k = \ln \bar{\delta} + \ln \frac{\bar{y}_k}{\left( \sum_j \sum_i \bar{\xi}'_{i,j} \bar{g}_{i,j,k} \right)} \quad \forall k \quad (6.15)$$

ただし、ここでの基準マトリクス  $\bar{\xi}'_{i,j}$  は、以下のように固定される観測値  $b_0$  によって  $\bar{\xi}_{i,j}$  をスケーリングしたものとする。

$$\bar{\xi}'_{i,j} = \bar{\xi}_{i,j} \frac{\bar{b}_0}{\sum_{jj} \sum_{ii} \bar{\xi}_{ii,jj} \bar{g}_{0,ii,jj}} \quad \forall i, j \quad (6.16)$$

ここで、 $\bar{\delta}$  はすべての  $k$  に対してデフォルトで設定されている  $r_k$  の動ける範囲である。

式(6.15)の設定は、固定される観測値によってスケーリングされた基準マトリクスと観測値がかけ離れているほど、その観測値の信頼度は低下し、 $r_k$  は動きやすくなり、推計値  $x_{i,j}$  は観測値から離れやすくなる。一方、基準マトリクスと観測値が近ければ、推計値は観測値から離れにくくなる。本手法の実際の適用時には  $\bar{\delta}$  は 10 とした。

#### 6.4.5 変数 $\bar{\beta}_k$ の決め方

観測値がエネルギー転換効率、エネルギーロス率、自家消費率などの割合に関する情報のほうが、エネルギー量を直接観測した情報より重要視するとし、 $\bar{\beta}_k$  を定めた。

- (1) 観測値がエネルギー転換効率、エネルギーロス率、自家消費率のとき 10
- (2) それ以外のエネルギー量の観測値を 1 から 5 の間の値とし、観測値の大きさに依存するようにする。

そこで、(2)のときは観測値の対数が一次関数になるようにした。

$$\bar{\beta}_k = c \cdot \ln b_k + d \quad (6.17)$$

この一次関数が、各重みの最大値と最小値のときにそれぞれの重みの上限と下限を通るようにし、 $c$ 、 $d$  を決める。ここで、重みの上限と下限が  $av$ 、 $iv$  であったとすると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} c &= \frac{av - iv}{\ln(\max_k b_k) - \ln(\min_k b_k)} \\ d &= \frac{av \cdot \ln(\max_k b_k) - iv \cdot \ln(\min_k b_k)}{\ln(\max_k b_k) - \ln(\min_k b_k)} \end{aligned} \quad (6.18)$$

ここでは、上限を 5、下限を 1 として、上記の式を適用した。

#### 6.4.6 変数 $\bar{\omega}$ の決め方

$\bar{\omega}$  は、基準マトリクスと推計値の乖離(式(6.14)の第一項)に対して、観測値と推計値の乖

離(式(6.14)の第二項)をどの程度重視するかという重みとなる。ただし、式(6.14)中の第一項と第二項は直接比較できる数値ではないため、ここでは経験的に $\bar{\omega}$ を決定することとした。

そこで、基準マトリクスと観測値という 2 つの情報それぞれと、推計値との乖離がどのようなときが望ましいかという原則を決め、その望ましい条件となるように $\bar{\omega}$ を定める。本研究ではこれら二つの情報間に差はないと考え、推計値の乖離として以下のものが望ましいと考えた。

「推計値と観測値、推計値と基準マトリクスとの距離を定義し、その距離が等しいときその推計値は観測値と基準マトリクスの中間的な位置に存在し、最も望ましい」

この原則に従うとし、推計値と観測値の距離、推計値と基準マトリクスとの距離を定義する。ここでは、マハラノビス汎距離を用いる。ある情報種  $k$  における対象期間の推計値、観測値、基準マトリクスの情報をそれぞれ、 $z_k^1$ 、 $z_k^2$ 、 $z_k^3$  と表すとする。ここで、 $k \in K$  は、対象期間において推計値、観測値、基準マトリクスの 3 つの情報すべてでお互い比較可能な項目(石炭の最終消費、石油の発電への投入などで、3 つとも情報を持っているような項目)の集合である。推計値と観測値、基準マトリクスと推計値のマハラノビス汎距離を  $d_{12}$ 、 $d_{13}$  とし、それぞれは以下のように表される。

$$\begin{aligned} d_{12}(z_k^1, z_k^2) &= \sqrt{\sum_k \frac{(z_k^1 - z_k^2)^2}{\sigma_k^2}} \\ d_{13}(z_k^1, z_k^3) &= \sqrt{\sum_k \frac{(z_k^1 - z_k^3)^2}{\sigma_k^2}} \end{aligned} \quad (6.19)$$

ここで、 $\sigma_k$  は、本来情報  $k$  の持っている確率分布に基づく標準偏差であるが、ここでは観測値、基準マトリクス、推計値の標準偏差で代用する。

次に $\bar{\omega}$ を幾通りか設定し、 $d_{12}$  と  $d_{13}$  の比( $d_{13}/d_{12}$ )を国別に比較したときにどのような分布となるかを調べてみる。まず、 $\bar{\omega}$ が 1、0.1、0.01 の時の国別の( $d_{13}/d_{12}$ )を示す。図 6.1 はその国別の( $d_{13}/d_{12}$ )のヒストグラムを表したものである。また、それぞれの平均値、中央値、標準偏差を表 6.4 に示す。

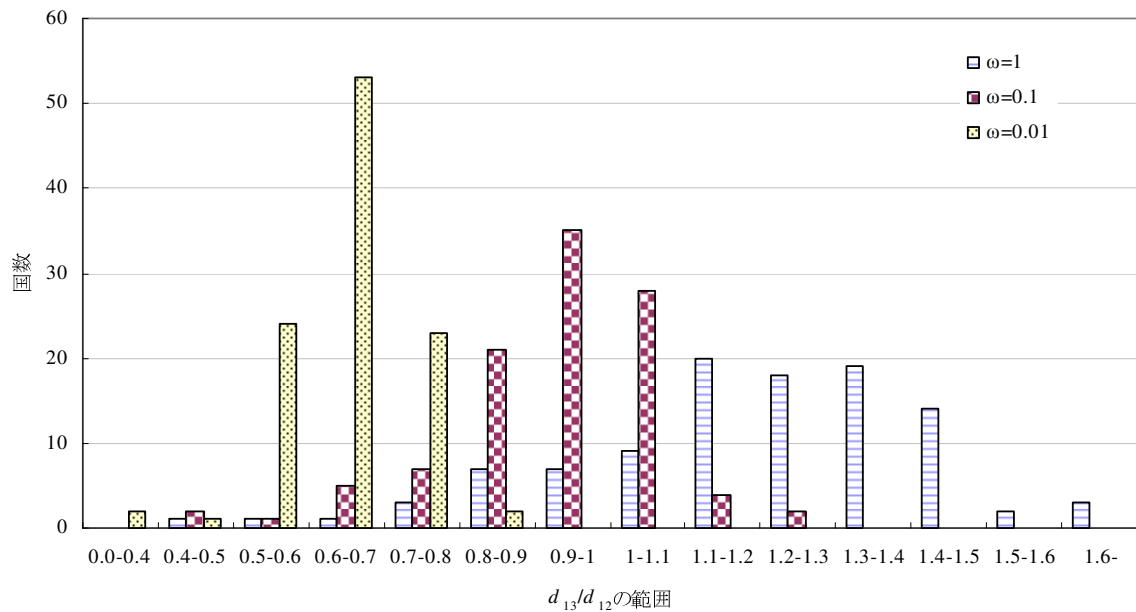


図 6.1  $\bar{\omega}$  が 1、0.1、0.01 の時の  $(d_{13}/d_{12})$  の分布

表 6.4  $\bar{\omega}$  が 1、0.1、0.01 の時の国別  $(d_{13}/d_{12})$  の平均値、中央値、標準偏差

	$\omega=1$	$\omega=0.1$	$\omega=0.01$
平均値	1.20	0.93	0.65
中央値	1.21	0.96	0.65
標準偏差	0.23	0.14	0.08

図を見ると、 $\bar{\omega}$  が大きくなるにつれて分布が右へ移動していることがわかる。これは、 $\bar{\omega}$  が大きいほど、 $d_{13}$  より  $d_{12}$  のほうが大きくなる、すなわち推計値の基準マトリクスとの距離のほうが推計値と観測値との距離よりも大きくなり、推計値は観測値に近いことを意味する。 $\bar{\omega}$  はもともと観測値に対する重みなので、およそ予想される挙動である。次に、 $\bar{\omega}$  の平均値を見ると、 $\bar{\omega}$  が 1、0.1、0.01 のときにそれぞれ 1.20、0.93、0.65 となり、 $\bar{\omega}$  が 0.1 のときに推計値は観測値と基準マトリクスの中間的な位置に存在していることがわかる。中央値で見た場合も同じような傾向で、それぞれ 1.21、0.96、0.65 となった。

これらの情報のみから、 $\bar{\omega}$  が 0.1 のときが最適であるとは言えないが、 $\bar{\omega}$  が 0.1 のときにおよそ推計値は観測値と基準マトリクスの中間的な位置にあると判断し、本研究では  $\bar{\omega}=0.1$  を採用することとした。

## 6.5 結果および考察

本節では、本手法で得られた結果およびその考察を示す。ここでは 3 つの観点から結果を見る。まず、全エネルギー源の最終消費エネルギー量について統計値と比較する。次に、既存の統計の問題点として挙げたエネルギー転換効率の問題を示し、それが本研究の方法により改善したことを示す。最後に、統計値と推計値の乖離度を要因分解し、どういった国、エネルギー源、部門で統計値と推計値の乖離が大きかったかを示す。

### 6.5.1 最終エネルギー消費量の統計値との比較

IEA の Energy Balance(IEA, 2007a; 2007b)に対する本研究推計値の最終エネルギー消費量の割合を地域別に計算し、その平均値、最大値、最小値、標準偏差を表 6.5、図 6.2 に示す。まず、世界全体で見ると、平均値が 0.982、最大値が 0.994、最小値が 0.972 となった。全体として推計値は IEA の報告値より小さくなった。地域別で見ても、24 地域中 16 地域で平均値が 1 を下回った。平均値で見たときに最も乖離が大きかったのは、カナダの 0.940、その他アフリカの 1.044 であった。最大値はすべての地域で 1.1 を下回ったが、最小値は 0.9 を下回る地域が 3 地域あり、韓国で 0.896、メキシコで 0.888、中東で 0.855 となった。全体として乖離は±15%以内であり、最終消費エネルギー全体としてみると、そこまで大きな乖離はなかったと言える。

表 6.5 統計値(IEA)の最終エネルギー消費量に対する推計値の国別統計量

	平均値	最大値	最小値	標準偏差
世界全体	0.982	0.994	0.972	0.006
オーストラリア	0.929	0.973	0.876	0.022
ニュージーランド	0.996	1.047	0.944	0.026
日本	0.977	1.002	0.950	0.015
韓国	0.965	1.002	0.896	0.026
中国	1.003	1.050	0.935	0.029
インド	0.983	0.999	0.952	0.011
インドネシア	1.018	1.073	0.978	0.022
タイ	0.991	1.068	0.949	0.023
その他アジア	1.023	1.044	1.001	0.012
その他東南アジア	1.019	1.041	0.986	0.013
アメリカ	0.965	1.005	0.930	0.015
カナダ	0.940	0.972	0.900	0.018
メキシコ	0.965	1.015	0.888	0.026
EU15	0.989	1.032	0.955	0.021
EU10	0.978	0.998	0.953	0.010
CIS	1.001	1.048	0.972	0.020
アルゼンチン	0.992	1.017	0.961	0.013
ブラジル	0.980	1.003	0.959	0.013
その他ラテンアメリカ	1.001	1.048	0.932	0.026
中東	0.892	0.959	0.855	0.029
南アフリカ	0.989	1.042	0.907	0.034
その他アフリカ	1.044	1.091	0.998	0.026
その他地域	0.971	0.990	0.928	0.013

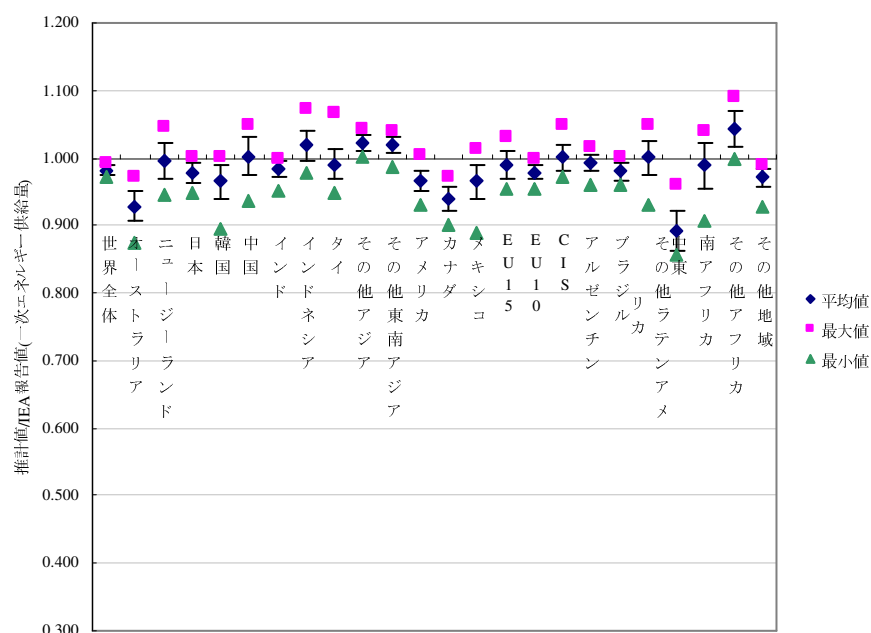


図 6.2 統計値(IEA)の最終エネルギー消費量に対する推計値の国別統計量  
(エラーバーは標準偏差を表す。)

### 6.5.2 エネルギー転換効率

次に、エネルギー転換効率について示す。まず、IEA(2007a,2007b)のエネルギー転換効率  
が本研究で設定した上限を越えていた国、年がどの程度あったかを表 6.6 に示す。表 6.6  
では、石炭、天然ガス、石油それぞれについて発電、CHP、発熱プラントの 9 つの項目を  
扱い、上限を越えた国、年の数を表してる。また、2 段目はレコード数全体に対する割合  
を表している。上限を越えたレコード数で見ると、石油の発電、天然ガスの発熱が大きく、  
それぞれ 148、126 となった。割合で見ると、発熱プラントが全般に大きく、天然ガス、石  
油でそれぞれ 28.4%、20.4%となり、20%を越える国、年で上限を越えていた。発電や CHP  
でも天然ガスの発電を除き 4%以上の国、年が上限を越えていた。

表 6.6 IEA(2007a, 2007b)においてエネルギー転換効率が上限を越えている国、年

	発電	CHP	発熱
石炭	70	47	63
天然ガス	76	42	126
石油	148	76	95
石炭	4.2%	5.7%	16.3%
天然ガス	3.9%	5.6%	28.4%
石油	4.9%	8.5%	20.4%

本研究推計値ではこれらの問題は解消されている。例えば、下の図 6.3 は石炭の発電の  
エネルギー転換効率を国別にプロットしたものである。同じ項目について IEA の値を図  
6.4 に示しているが、IEA の値が改善されていることがわかる。

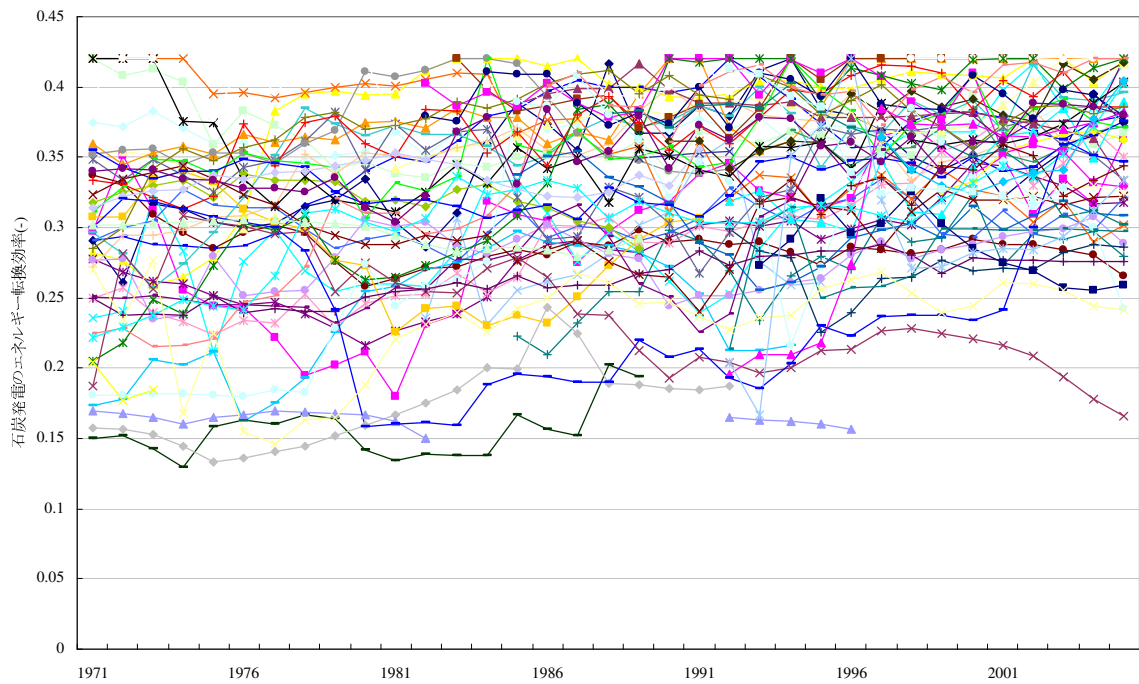


図 6.3 石炭発電のエネルギー転換効率(推計値)

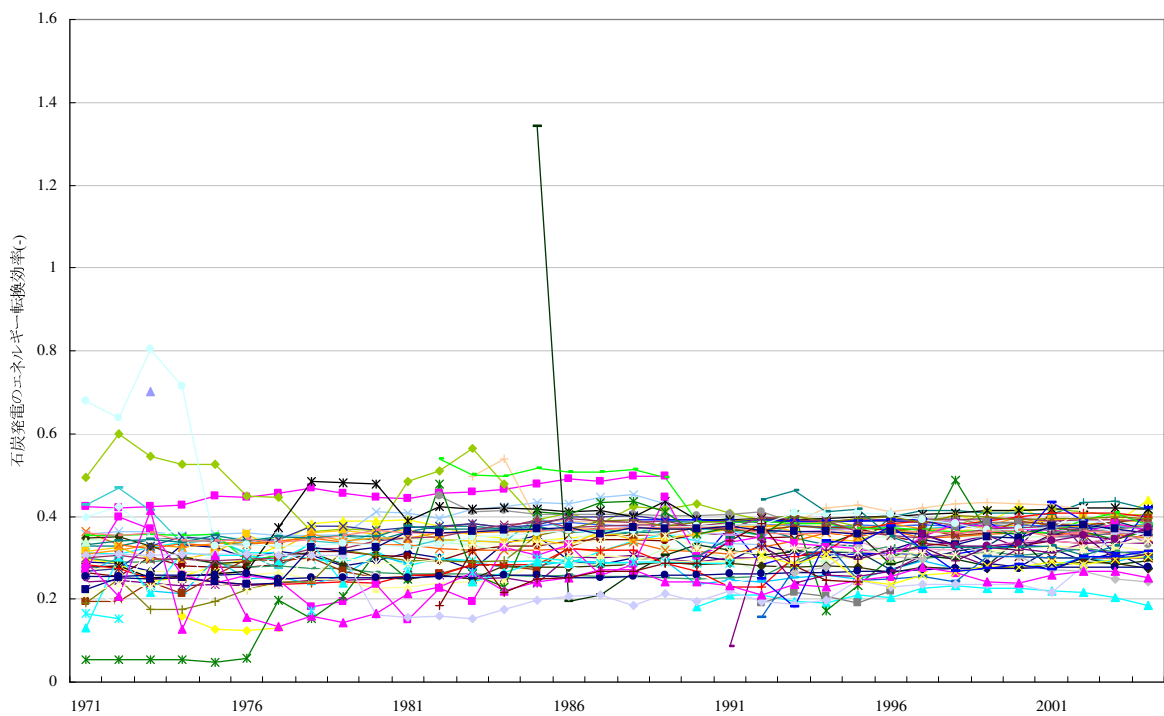


図 6.4 石炭発電のエネルギー転換効率(IEA, 2007a; 2007b)

### 6.5.3 統計値と推計値の部門別比較

本項では、部門別で統計値からの乖離を見る。そこで、以下のモデル(数量化 1 類)を用いる。



$$\log \frac{x_{i,j,m,r,t}}{x_{i,j,m,r,t}} = \log a_{j,m}^1 + \log a_{i,r,t}^2 + rsd_{i,j,m,r,t} \quad (6.20)$$

ここで、 $x_{i,j,m,r,t}$  は、 $t$  年、 $r$  地域における  $i$  行、 $j$  列における、フローの種類  $m$  の推計値を表す。ここで、フローの種類  $m$  は、表 6.3 で示した勘定表の左下部分の投入フロー、右上部分の産出フローの 2 種類を表すサフィックスである。 $\overline{x_{i,j,m,r,t}}$  は、推計値に対応する観測値であり、ここでは IEA のエネルギーバランス表(IEA, 2007a; 2007b)を観測値として用いる。 $a_{j,m}^1$  は、部門  $j$ 、フロー  $m$  の観測値と推計値の乖離を表し、 $a_{i,r,t}^2$  はエネルギー源  $i$ 、地域  $r$ 、 $t$  年における観測値と推計値の乖離を表し、 $rsd_{i,j,m,r,t}$  は誤差項である。

以下にその結果を示す。図 6.5 は産出フローと投入フローそれぞれについて部門別で基準化した係数  $a_{j,m}^1$  の値を示している。 $a_{j,m}^1$  は部門の特性を表す変数である。今回の分析では部門を集約化して、13 部門とした。まず、最も乖離が大きかったのは、投入フローでは石油精製 (0.064)、熱供給 (-0.042)、産出フローでは、CHP(0.056)、石油精製(-0.023)となった。特に石油精製に注目すると、産出、投入フローともに大きな値を示したが、その乖離の方向(符号)は逆であった。つまり、推計値は IEA の報告値と比べて、投入フローが大きくなり、産出フローが小さくなっていた。図 6.6 に IEA の国別の報告値の石油精製におけるエネルギー転換効率を示すが、これを見てもわかるようにエネルギー転換効率が 1 を超えている国が多数見られ、今回の調整により上記のような結果となったと考えられる。

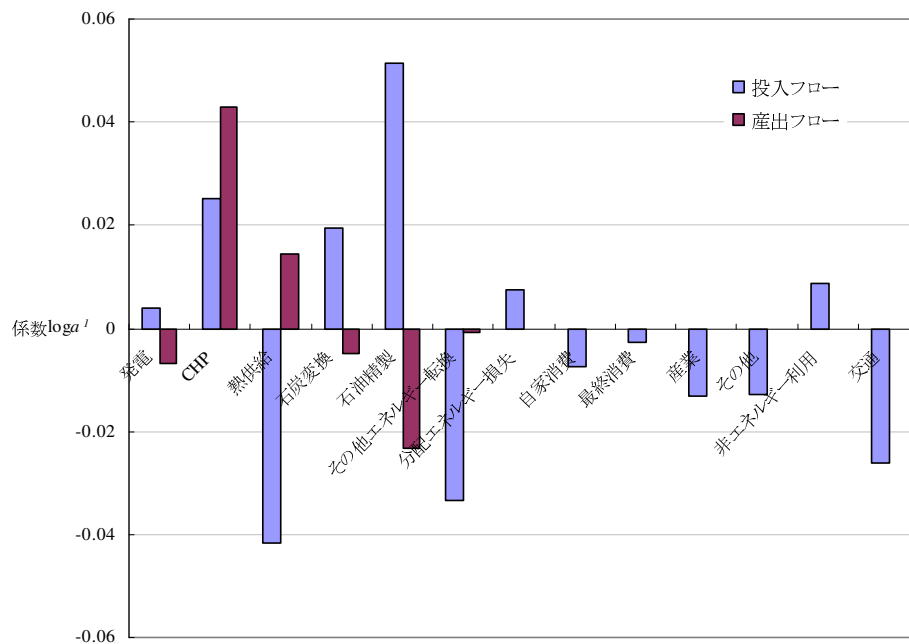


図 6.5 部門別修正量(基準化された  $\log a_{j,m}^1$ )

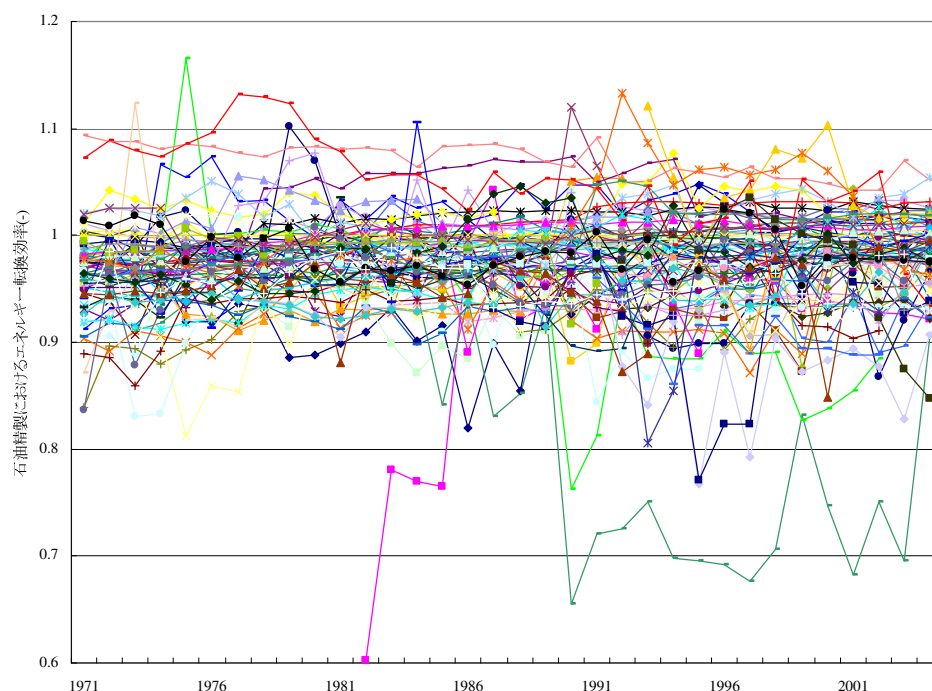


図 6.6 石油精製におけるエネルギー転換効率(IEA, 2007a; 2007b)

#### 6.5.4 統計値と推計値の国別比較

本項では、国別で統計値からの乖離を見る。前項と同様に、以下のような数量化 1 類のモデルを用いる。

$$\log \frac{x_{i,j,m,r,t}}{x_{i,j,m,r,t}} = \log a_r^3 + \log a_{i,j,m,t}^4 + rsd_{i,j,m,r,t} \quad (6.21)$$

ここで、 $a_r^3$  は、国  $r$  の観測値と推計値の乖離を表し、 $a_{i,j,m,t}^4$  はエネルギー源  $i$ 、部門  $j$ 、フロー  $m$ 、 $t$  年における観測値と推計値の乖離を表す。ここでは、6.5.1 項と同様に地域を 24 に集約して分析した結果を示す。

図 6.7 は基準化した係数  $\log a_r^3$  を、地域別で示したものである。正負の方向に乖離が大きかった 2 地域はそれぞれ、その他アフリカ(0.087)、その他地域(0.085)、カナダ(-0.052)、オーストラリア(-0.046)であった。OECD 諸国の中でも日本や韓国は比較的乖離が小さくそれぞれ -0.007、-0.013 であったが、OECD 諸国 EU15 やアメリカなどの国では比較的乖離が大きいことがわかる。これらの結果から、調整は non-OECD 諸国のような地域で大きく行われたわけではなく、OECD 諸国の中でも調整が行われたことを示している。

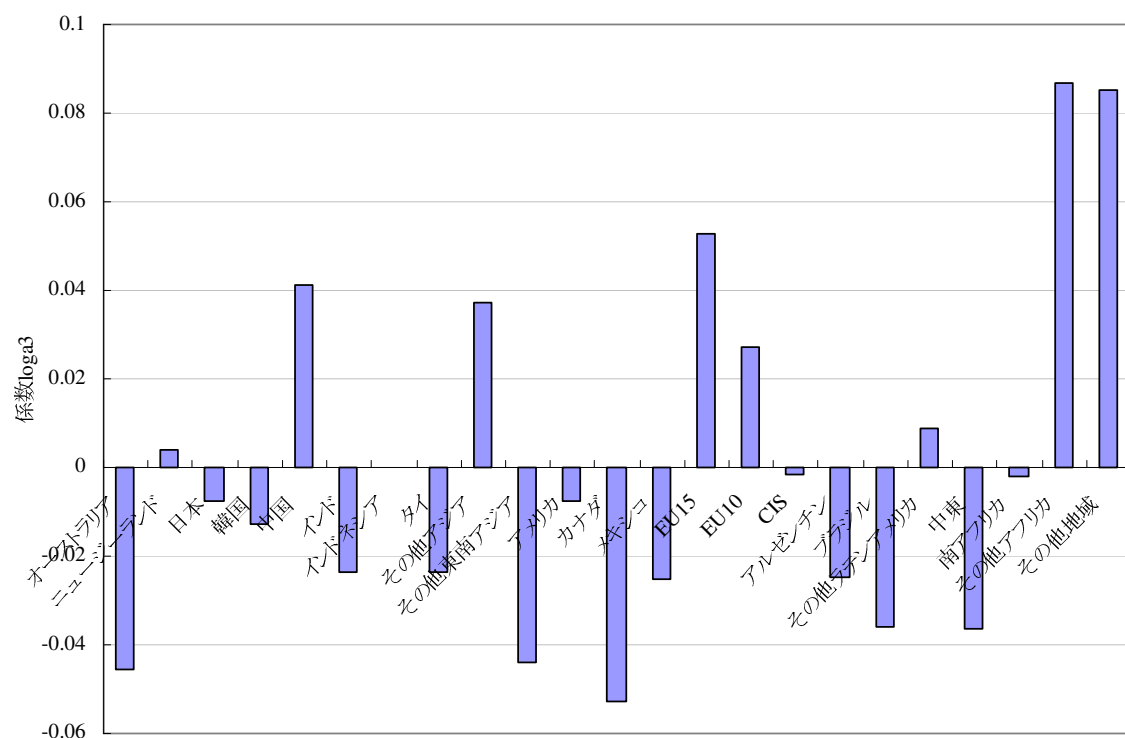


図 6.7 基準化された  $\log a^3_r$

## 6.6 おわりに

本研究では、IEA の Energy Balance の問題点を指摘し、それを修正する手法を提案した。また、実際にその手法を適用し、データの修正を試みた。その結果、IEA の Energy Balance の問題点は修正された。また、IEA の Energy Balance と本研究の推計値を比較し、IEA の Energy Balance で問題の大きかった点、それらからの修正について以下のことが明らかとなった。最終エネルギー消費量で見ると、カナダ、その他アフリカ、韓国、メキシコ、中東で IEA と推計値との乖離が大きかった。発電プラント、発熱プラントのエネルギー転換効率について見ると IEA では、石油の発電プラント、天然ガスの発熱プラントで物理的上限を突破している数が多かった。また、部門別で比較すると石油精製部門で修正が大きかった。国別で見た場合は、途上国のアフリカ地域やその他世界といった地域で修正が大きかったが、OECD 諸国の中でもオーストラリア、カナダ、などでいくつかの国では修正量が大きかった。

## 参考文献

- [1] BP(British Petroleum)(2007): Statistical Review of World Energy, BP.
- [2] EIA(Energy Information Administration)(2007): Energy Statistics, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA.
- [3] Enerdata(2008): Globalstat, Enerdata, Grenoble, France.
- [4] 藤森真一郎, 松岡譲(2008): エネルギー統計・経済統計の統合とそれを用いた世界全域

における化石燃料起源のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の推計に関する研究,  
環境システム研究論文集, **36**, 37-48.

- [5] Golan, A., G. Judge, and D. Miller(1996): Maximum Entropy Econometrics: Robust Estimation with Limited Data, John Wiley & Sons Ltd, England.
- [6] IEA(International Energy Agency)(2007a): Energy Balance of OECD countries, International Energy Agency, Paris, France.
- [7] IEA(International Energy Agency)(2007b): Energy Balance of non-OECD countries, International Energy Agency, Paris, France.

## 付録

### A. 用語の定義

ここでは、推計の説明で用いる各種用語の定義を行う。

#### (1) 一次エネルギー供給

一次エネルギー供給は、ある国に国内供給されたエネルギーのエネルギー源別の内訳と総量を指す。一次エネルギー供給は、国内産出、輸出、輸入、在庫増減に分かれる。

#### (2) エネルギー転換部門

ある国の国内に供給されたエネルギー源について、国内供給された差異のエネルギー源と異なるエネルギー源を製造・生成するために、発電、蒸気発生、化学変化、分離・混合、位置エネルギー変化などの操作を行う活動主体を総じてエネルギー転換部門と呼ぶ。エネルギー転換部門はエネルギー転換活動と自家消費活動に分類される。

#### (3) エネルギー転換活動

ある国の国内に供給されたエネルギー源について、国内供給された差異のエネルギー源と異なるエネルギー源を製造・生成するために、発電、蒸気発生、化学変化、分離・混合、位置エネルギー変化などの操作を行う活動。ただし、これらの活動に付随する自家消費活動はこれに含めない。

#### (4) 自家消費活動

自家消費活動とはエネルギー転換活動を行うために、得られたエネルギー源の一部を消費する活動である。

#### (5) 最終消費部門

最終消費部門はある国において国内供給されたエネルギー源またはエネルギー転換を経て製造されたエネルギー源を消費する活動主体である。最終消費部門は、産業、交通、その他、非エネルギー利用の4つ中分類部門に分類される。

#### (6) エネルギー転換効率

エネルギー転換活動における、投入エネルギーの総量あたりの産出エネルギー総量をエネルギー転換効率と呼ぶ。ただし、ここでいう産出エネルギーには、自家消費、送電ロス、分配ロスのエネルギー量も含む。

## B. 地域区分

### 【原則】

1. エネバラ表の整備のための国・地域については、次ページの分類を用いる  
94 カ国＋集約 12 地域であり、単一国として扱う国は以下のような基準で決定した。  
すなわち、2000 年における GDP が大きな国から順番に GDP を足していき、その合計量が世界全体の GDP の 99%以上となる国までを単一国とした。
2. 国の統一・分裂については、以下のルールに則って、データを整備する

附表 B.1 統合分裂のあった国

国の統一			
	分裂	統一	対象国
ドイツ	1989年まで	1990年から	旧東ドイツ・旧西ドイツ
国の分裂			
	統一	分裂	対象国
旧ソ連	1991年まで	1992年から	ロシア・エストニア・ラトビア・リトアニア・ウクライナ・ベラルーシ・モルドバ・グルジア・アゼルバイジャン・アルメニア・カザフスタン・キルギスタン・トルクメニスタン・タジキスタン
旧ユーゴスラビア	1991年まで	1992年から	クロアチア・ボスニアヘルツェゴビナ・スロベニア・マケドニア・セルビアモンテネグロ <sup>*1)</sup>
旧エチオピア	1992年まで	1993年から	エチオピア・エリトリア
旧チェコスロバキア	1992年まで	1993年から	チェコ・スロバキア

- 1)セルビアモンテネグロはセルビア、モンテネグロという二つの国に分かれているが、作業上は「セルビアモンテネグロ」地域として取り扱う。

### ◎上に示した国・地域以外の注意点◎

- (1) Yemen は 1990 年以前についても統合された状態で取り扱う。
- (2) Vietnam は 1976 年以前についても統合された状態で取り扱う。
- (3) Panama は 1973 年以前もパナマ運河を含む
- (4) South Africa は 1990 年以前も Namibia を分離した状態で取り扱う。ただし、Namibia はその他南アフリカ関税同盟(XSD)を構成する国の一つとして扱う。
- (5) Belgium と Luxemburg については全年にわたり統合して取り扱う。
- (6) East Timor は、2002 年以降も Indonesia と統合して取り扱う。

国・地域名	AIM code
Algeria	DZA
Argentina	ARG
Australia	AUS
Austria	AUT
Bangladesh	BGD
Belarus	BLR
Belgium-Luxembourg	58
Brazil	BRA
Brunei Darussalam	BRN
Bulgaria	BGR
Canada	CAN
Chile	CHL
China	CHN
China, Hong Kong SAR	HKG
Colombia	COL
Costa Rica	CRI
Croatia	HRV
Cuba	CUB
Czech Rep.	CZE
Czechoslovakia	CSHH
Cote d'Ivoire	CIV
Dem. People's Rep. of Korea	PRK
Denmark	DNK
Dominican Rep.	DOM
Ecuador	ECU
Egypt	EGY
El Salvador	SLV
Finland	FIN
Fmr Dem. Rep. of Germany	DDDE
Fmr Fed. Rep. of Germany	280
Fmr USSR	SUHH
Fmr Yugoslavia	890
France	FRA
Germany	DEU
Greece	GRC
Guatemala	GTM
Hungary	HUN
India	IND
Indonesia	IDN
Iran	IRN
Iraq	IRQ
Ireland	IRL
Israel	ISR
Italy	ITA
Japan	JPN
Kazakhstan	KAZ
Kenya	KEN
Kuwait	KWT
Lebanon	LBN
Libya	LBY
Malaysia	MYS
Mexico	MEX
Mongolia	MNG
Morocco	MAR
Netherlands	NLD
New Zealand	NZL
Nigeria	NGA
Norway	NOR
Oman	OMN
Pakistan	PAK
Panama	PAN
Peru	PER
Philippines	PHL
Poland	POL
Portugal	PRT
Qatar	QAT
Rep. of Korea	KOR
Romania	ROU
Russian Federation	RUS
Saudi Arabia	SAU
Serbia and Montenegro	CSXX

国・地域名	AIM code
Singapore	SGP
Slovakia	SVK
Slovenia	SVN
South Africa	ZAF
Spain	ESP
Sri Lanka	LKA
Sudan	SDN
Sweden	SWE
Switzerland	CHE
Syria	SYR
Thailand	THA
Tunisia	TUN
Turkey	TUR
USA	USA
Ukraine	UKR
United Arab Emirates	ARE
United Kingdom	GBR
Uruguay	URY
Uzbekistan	UZB
Venezuela	VEN
Viet Nam	VNM
Yemen	YEM
Chinese Taipei	TWN
Rest of Oceania	XOC
Rest of South Asia	XSA
Rest of Southeast Asia	XSE
Baltic countries	XBT
Rest of EU10	XE10
Rest of Europe	XER
Rest of CIS countries	XCI
Rest of central America	XCA
Rest of South America	XSM
Rest of East Middle	XME
Rest of Africa	XSS
Rest of former Yugoslavia	XYU

特別集約地域

Others Europe(non-EU 27 or non-CEMBUREAU)	XEU27
Total America	Z_AME
Arabia	Z_ARB
TOTAL ASIA	Z_ASA
Central America	Z_CA
Total CEMBUREAU	Z_CEM
EAST ASIA	Z_EA
East Africa	Z_EAF
East Coast South America	Z_ECSA
European Union 27	Z_EU27
North Africa	Z_NAF
Europe Non-CEMBUREAU	Z_NCEM
Southern Africa	Z_SAF
South East Asia	Z_SEA
SOUTH WEST ASIA	Z_SWA
WEST ASIA	Z_WA
West Coast South America	Z_WCSA
EU-25	Z_EU25
EU-15	XE15
World	Z_TOT

集約地域	国・地域名	AIM code
<b>XOC</b>	American Samoa	ASM
	Br. Antarctic Terr.	BQAA
	Br. Indian Ocean Terr.	IOT
	Christmas Isds	CXR
	Cocos Isds	CCK
	Cook Isds	COK
	FS Micronesia	FSM
	Fiji	FJI
	Fr. South Antarctic Terr.	FQHH
	French Polynesia	PYF
	Guam	GUM
	Kiribati	KIR
	Marshall Isds	MHL
	N. Mariana Isds	MNP
	Nauru	NRU
	New Caledonia	NCL
	Niue	NIU
	Norfolk Isds	NFK
	Palau	PLW
	Papua New Guinea	PNG
	Pitcairn	PCN
	Samoa	WSM
	Solomon Isds	SLB
	Tokelau	TKL
	Tonga	TON
	Tuvalu	TUV
	US Misc. Pacific Isds	PUUM
	United States Minor Outlying Islands	UMI
	Vanuatu	VUT
	Wallis and Futuna Isds	WLF
	New Zealand Oceania	NZOC
	Rest of Australasia	XAUS
	British West Pacific Islands	BWPI
	French Ind. Ocean Territory	FOPT
	Fr South Ter	ATF
	Canton Island	CTKI
	Gilbert and Ellice Islands	GEHH
	Johnston Island	JTUM
	Midway Islands	MIUM
	Trust Territory of the Pacific	PCHH
	Wake Island	WKUM
<b>XSA</b>	Nepal	NPL
	Afghanistan	AFG
	Maldives	MDV
	Bhutan	BTN
<b>XSE</b>	Myanmar	MMR
	Cambodia	KHM
	Lao People's Dem. Rep.	LAO
	Burma	BUMM
	Ryukyu Islands/Nansei Islands	647
<b>XBT</b>	Lithuania	LTU
	Latvia	LVA
	Estonia	EST
<b>XE10</b>	Cyprus	CYP
	Malta	MLT
<b>XER</b>	Iceland	ISL
	Albania	ALB
	Liechtenstein	LIE
	Andorra	AND
	Faeroe Isds	FRO
	Gibraltar	GIB
	San Marino	SMR
	Svalbard and Jan Mayen	SJM
	Vatican City State	VAT
	Monaco	MCO
	Channel Islands	830
	Isle of Man	IMN
	Holy see	VAT
	Cyprus North	NCYP
	Cyprus South	SCYP
	Azores	AZR
<b>XCI</b>	Azerbaijan	AZE
	Turkmenistan	TKM
	Georgia	GEO
	Armenia	ARM
	Kyrgyzstan	KGZ
	Rep. of Moldova	MDA
	Tajikistan	TJK

集約地域	国・地域名	AIM code
<b>XCA</b>	Trinidad and Tobago	TTO
	Jamaica	JAM
	Anguilla	AIA
	Aruba	ABW
	Br. Virgin Isds	VGB
	British Virgin Islands & Montserrat	VGMS
	Cayman Isds	CYM
	Guadeloupe	GLP
	Martinique	MTQ
	Montserrat	MSR
	Neth. Antilles	ANT
	Neth. Antilles and Aruba	532
	Turks and Caicos Isds	TCA
	US Virgin Isds	VIR
	Puerto Rico	PRI
	Saint Martin	669
	Honduras	HND
	Nicaragua	NIC
	Bermuda	BMU
	Greenland	GRL
	Saint Pierre and Miquelon	SPM
	Belize	BLZ
	Antigua and Barbuda	ATG
	Bahamas	BHS
	Barbados	BRB
	Dominica	DMA
	Grenada	GRD
	Haiti	HTI
	Saint Kitts and Nevis	KNA
	Saint Kitts, Nevis and Anguilla	658
	Saint Lucia	LCA
	Saint Vincent and the Grenadines	VCT
	British West Indies	BWIN
	Curaçao & Aruba	CUAR
	Grenada, Bermuda, Antigua, Barbuda, & Others	GBAb
	Martinique Guadeloupe Dependencies	MGUA
	Other Netherlands Antilles	XANT
	French West Indies	FWI
	Leeward-Windward Islands	423
<b>XSM</b>	Bolivia	BOL
	Paraguay	PRY
	Falkland Isds (Malvinas)	FLK
	French Guiana	GUF
	Guyana	GUY
	South Georgia and the South Sandwich Islands	SGS
<b>XME</b>	Suriname	SUR
	Jordan	JOR
	Bahrain	BHR
	Palestinian Territory, Occupied	PSE
	West Bank	ISR-GAZ_e
	Gaza Strip	ISR-WBK_e



集約地域	国・地域名	AIM code
XSS	Angola	AGO
	United Rep. of Tanzania	TZA
	Cameroon	CMR
	Ethiopia	ETH
	Uganda	UGA
	Zimbabwe	ZWE
	Ghana	GHA
	Gabon	GAB
	Dem. Rep. of the Congo	COD
	Mauritius	MUS
	Madagascar	MDG
	Mozambique	MOZ
	Saychelles	SYC
	Zambia	ZMB
	Eritrea	ERI
	Fmr Ethiopia	ETH
	Benin	BEN
	Bouvet Island	BVT
	Burkina Faso	BFA
	Burundi	BDI
	Cape Verde	CPV
	Central African Rep.	CAF
	Chad	TCD
	Comoros	COM
	Congo	COG
	Djibouti	DJI
	Equatorial Guinea	GNQ
	Gambia	GMB
	Guinea	GIN
	Guinea-Bissau	GNB
	Heard Island and McDonald Islands	HMD
	Liberia	LBR
	Mali	MLI
	Mauritania	MRT
	Mayotte	MYT
	Niger	NER
	Rwanda	RWA
	Réunion	REU
	Saint Helena	SHN
	Sao Tome and Principe	STP
	Senegal	SEN
	Sierra Leone	SLE
	Somalia	SOM
	Togo	TGO
	Western Sahara	ESH
	Botswana	BWA
	Lesotho	LSO
	Malawi	MWI
	Namibia	NAM
	Swaziland	SWZ
	Equatorial Sahara&Equat. Guinea	EAEG
	Guinea Bissau & Sao Thome	GBST
	Mali, Mauritania and Senegal	MMAS
	Somalia, North Republic	NSOM
	Rwanda & Burundi	RWBU
	Sao Thome y Principe Cape Verde & Guinea Bissau	SCGB
	Tangier	TNGI
	Canary Islands	CNR
	Fernando Po	GNQ
	Madeira Islands	MDI
	French Equatorial Africa	263
	Fr.Ter.Africa-Issas	AIDJ
XYU	Bosnia Herzegovina	BIH
	TFYR of Macedonia	MKD

## C. エネルギー転換効率の設定方法

エネルギー転換効率の設定については以下の方針を採る。

- (1) エネルギー統計(IEA の Energy Balance)から計算したエネルギー転換効率が妥当かどうか判断する
- (2) 妥当と判断された場合はそれを用いる
- (3) 妥当でないと判断された場合は推定した値を用いる

以下では、まず妥当かどうかを判断する方法についてのべ、次に妥当でないと判断された場合の推定方法について述べる。

### C.1. エネルギー統計のエネルギー転換効率の妥当性の検討

エネルギー統計のエネルギー転換効率として妥当でないのはエネルギー転換効率が物理的上限値を超えている場合である。

エネルギー転換効率の物理的上限値は以下のように設定した。

附表 C.1 転換効率上限値

	発電	CHP	発熱	コークス炉	高炉	石炭変換	石油精製
固体	0.42	0.85	1.00	1.00	1.00	1.00	
液体	0.48	0.85	1.00				
気体	0.52	0.85	1.00				1.00

ここで言う固体は、石炭、コークス、その他石炭製品を指し、気体は、天然ガス、コークス炉ガス、高炉ガスを指し、液体は原油、石油製品を指す。

また、それぞれの値の根拠を以下に示す。

附表 C.2 転換効率上限値の根拠

	日本の発電効率(ETP, 2008)
	IEAのデータからは何も判断できなかった(ETP, 2008)
	(ETP, 2008)によると西ヨーロッパで最大の49%となっていた。一方、IEAのデータを見るとイギリスが2003年で51%を超える発電効率となっていた。それ以外はおおよそ、50%以下であり、50%を超えてくるような国は明らかに異常報告であると判断した。(ETP, 2008)
	日本の1999-2003年の5年間の発電効率が47%台であった。ETPでは液体燃料の発電について言及せず。
	熱供給に関する文献からは、CHPについては数字が出ているが、熱プラント単独のエネルギー効率は出てこない ポーランドの事例研究をした論文があったが、その情報だけで上限を設定するのは困難であると思われたため、CHPと同じ値とした
	特に文献もなく、IEAのデータを見ていても1付近に値が集まっている

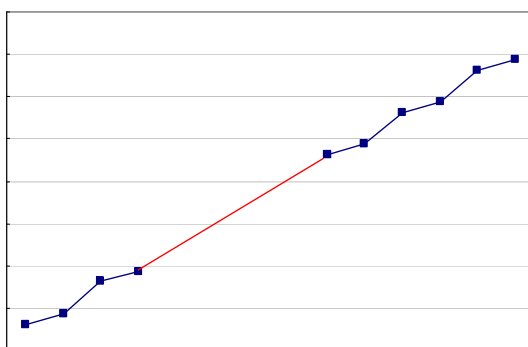
上記のエネルギー源以外のエネルギー転換効率について述べる。IEA の定義に従い、原子力は 0.33、地熱発電は 0.5、地熱の熱供給は 0.1 であり、それ以外は 1 とする。

## C.2. エネルギー転換効率の推定

前項のエネルギー転換効率が妥当でないと判断されたもの、または欠測があるものについては推定を行う。それら適切でないデータのパターンは以下の3パターンある。

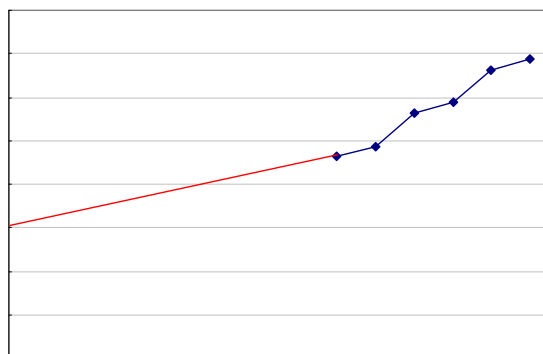
- (1) 対象期間すべて欠測
- (2) 対象期間の一部が欠測しているが、その欠測の年よりも前か後の年を見たらデータが存在する(ここでいう前か後何年離れていてもよい)
- (3) 対象期間の一部が欠測しているが、前後どちらかはデータが存在しない

このうち、(2)の場合は、前後のデータが存在するところから線形補間する(下の図はそのイメージ)。



附図 C.1 一部欠測の場合の線形補間イメージ

(3)の対象期間が一部欠測しているが前後どちらかのデータが存在しない場合は、下図のように欠測部分を線形で延ばす。ただし、その傾きは次節の方法で推計し、それを適用する。



附図 C.2 片側欠測の補完イメージ図

(1)の場合のエネルギー転換効率の推定方法を示す。

$$E_{i,j,r,t} = \alpha_{i,j,r}^1 + \alpha_{i,j}^2 \cdot t \quad (1)$$

ここで、 $E_{i,j,r,t}$  を燃料  $i$ 、プラントタイプ  $j$ 、国  $r$ 、 $t$  年における転換効率、 $\alpha_{i,j,r}^1$ 、 $\alpha_{i,j}^2$  は係数である。この式は、各効率が年の一次関数として表されるとしている。

次に  $\alpha^1_{i,j,r}$ 、 $\alpha^2_{i,j}$  のパラメータを推計する。前節の上限値を超えていないデータを用いて最小二乗法にて推定した。推計は燃料 3 種(固体、液体、気体)×プラント 3 種(発電、CHP、発熱)、および、コークス炉、高炉、石炭変換、石油精製で行った。また、ここで得られる傾き  $\alpha^2_{i,j}$  を上記の欠測パターン(3)に適用する。

### C.3. 結果

#### C.3.1. 適合度

まずは、これらが上記の線形回帰にどの程度適合したかを示すために、上記の 9 パターンの  $R^2$  を示す。

附表 C.3 各式の  $R^2$

	発電	CHP	発熱	コークス炉	高炉	石炭変換	石油精製
固体	0.99	0.94	0.95	0.95	0.98	0.88	
気体	0.97	0.92	0.93				
液体	0.96	0.88	0.85				0.98

この手のクロスセクションデータで、 $R^2$  が 0.85 以上出ているので、全般に非常に高い適合率だと考える。特に発電プラントはすべて 0.95 以上となり、この回帰式はかなり妥当性を持っていると考えられる。

#### C.3.2. 回帰係数

回帰係数のうちタイムトレンドの  $\alpha^2_{i,j}$  について示す。

附表 C.4 回帰係数  $\alpha^2_{i,j}$

	発電	CHP	発熱	コークス炉	高炉	石炭変換	石油精製
固体	0.0022	0.0014	0.0000	0.0018	0.0000	0.0000	
気体	0.0026	0.0036	0.0022				
液体	0.0010	0.0041	0.0051				0.0000

経年変化と共に転換効率は上昇しているはずなので、事前の予想としては正の値がきてほしいところであり、実際にすべての値は正、もしくはほぼゼロであった。また、値自体について見ると、CHP で高めの値となっていて、気体、液体で 0.004%(=30 年で 10% 強の改善)となった。発電プラントについて見ると、0.001-0.003 でそれぞれ 30 年間で、3-10% 程度の効率改善となる。この値は、世界全体のプロットをしたものとおおよそ感覚としてあっていると考えられる。

高炉、石炭変換、石油精製については、効率改善はほぼゼロであった。これらについても実際にプロットしたものを見るとおおよそ感覚としてはあっている。

次に、回帰係数の定数項  $\alpha^1_{i,j,r}$  について見てみる。 $\alpha^1_{i,j,r}$  は国別、転換種別の回帰係数である。それぞれ国別の平均値と中央値を示す。

附表 C.5  $\alpha^I_{i,j,r}$  の平均と中央値

		発電	CHP	発熱	コークス炉	高炉	石炭変換	石油精製
平均値	固体	0.25	0.55	0.77	0.71	0.41	0.81	
	液体	0.29	0.43	0.56				0.96
	気体	0.27	0.51	0.76				
中央値	固体	0.26	0.56	0.78	0.73	0.40	0.82	
	液体	0.29	0.44	0.44				0.96
	気体	0.27	0.53	0.78				

中央値、平均値に大きな乖離はなく、代表値として平均値を用いることとした。

D. エネルギー投入産出勘定表

エネルギー投入 品目		単位	2016 2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100	2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	2116	2117	2118	2119	2120	2121	2122	2123	2124	2125	2126	2127	2128	2129	2130	2131	2132	2133	2134	2135	2136	2137	2138	2139	2140	2141	2142	2143	2144	2145	2146	2147	2148	2149	2150	2151	2152	2153	2154	2155	2156	2157	2158	2159	2160	2161	2162	2163	2164	2165	2166	2167	2168	2169	2170	2171	2172	2173	2174	2175	2176	2177	2178	2179	2180	2181	2182	2183	2184	2185	2186	2187	2188	2189	2190	2191	2192	2193	2194	2195	2196	2197	2198	2199	2200	2201	2202	2203	2204	2205	2206	2207	2208	2209	2210	2211	2212	2213	2214	2215	2216	2217	2218	2219	2220	2221	2222	2223	2224	2225	2226	2227	2228	2229	2230	2231	2232	2233	2234	2235	2236	2237	2238	2239	2240	2241	2242	2243	2244	2245	2246	2247	2248	2249	2250	2251	2252	2253	2254	2255	2256	2257	2258	2259	2260	2261	2262	2263	2264	2265	2266	2267	2268	2269	2270	2271	2272	2273	2274	2275	2276	2277	2278	2279	2280	2281	2282	2283	2284	2285	2286	2287	2288	2289	2290	2291	2292	2293	2294	2295	2296	2297	2298	2299	2300	2301	2302	2303	2304	2305	2306	2307	2308	2309	2310	2311	2312	2313	2314	2315	2316	2317	2318	2319	2320	2321	2322	2323	2324	2325	2326	2327	2328	2329	2330	2331	2332	2333	2334	2335	2336	2337	2338	2339	2340	2341	2342	2343	2344	2345	2346	2347	2348	2349	2350	2351	2352	2353	2354	2355	2356	2357	2358	2359	2360	2361	2362	2363	2364	2365	2366	2367	2368	2369	2370	2371	2372	2373	2374	2375	2376	2377	2378	2379	2380	2381	2382	2383	2384	2385	2386	2387	2388	2389	2390	2391	2392	2393	2394	2395	2396	2397	2398	2399	2400	2401	2402	2403	2404	2405	2406	2407	2408	2409	2410	2411	2412	2413	2414	2415	2416	2417	2418	2419	2420	2421	2422	2423	2424	2425	2426	2427	2428	2429	2430	2431	2432	2433	2434	2435	2436	2437	2438	2439	2440	2441	2442	2443	2444	2445	2446	2447	2448	2449	2450	2451	2452	2453	2454	2455	2456	2457	2458	2459	2460	2461	2462	2463	2464	2465	2466	2467	2468	2469	2470	2471	2472	2473	2474	2475	2476	2477	2478	2479	2480	2481	2482	2483	2484	2485	2486	2487	2488	2489	2490	2491	2492	2493	2494	2495	2496	2497	2498	2499	2500	2501	2502	2503	2504	2505	2506	2507	2508	2509	2510	2511	2512	2513	2514	2515	2516	2517	2518	2519	2520	2521	2522	2523	2524	2525	2526	2527	2528	2529	2530	2531	2532	2533	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	2543	2544	2545	2546	2547	2548	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559	2560	2561	2562	2563	2564	2565	2566	2567	2568	2569	2570	2571	2572	2573	2574	2575	2576	2577	2578	2579	2580	2581	2582	2583	2584	2585	2586	2587	2588	2589	2590	2591	2592	2593	2594	2595	2596	2597	2598	2599	2600	2601	2602	2603	2604	2605	2606	2607	2608	2609	2610	2611	2612	2613	2614	2615	2616	2617	2618	2619	2620	2621	2622	2623	2624	2625	2626	2627	2628	2629	2630	2631	2632	2633	2634	2635	2636	2637	2638	2639	2640	2641	2642	2643	2644	2645	2646	2647	2648	2649	2650	2651	2652	2653	2654	2655	2656	2657	2658	2659	2660	2661	2662	2663	2664	2665	2666	2667	2668	2669	2670	2671	2672	2673	2674	2675	2676	2677	2678	2679	2680	2681	2682	2683	2684	2685	2686	2687	2688	2689	2690	2691	2692	2693	2694	2695	2696	2697	2698	2699	2700	2701	2702	2703	2704	2705	2706	2707	2708	2709	2710	2711	2712	2713	2714	2715	2716	2717	2718	2719	2720	2721	2722	2723	2724	2725	2726	2727	2728	2729	2730	2731	2732	2733	2734	2735	2736	2737	2738	2739	2740	2741	2742	2743	2744	2745	2746	2747	2748	2749	2750	2751	2752	2753	2754	2755	2756	2757	2758	2759	2760	2761	2762	2763	2764	2765	2766	2767	2768	2769	2770	2771	2772	2773	2774	2775	2776	2777	2778	2779	2780	2781	2782	2783	2784	2785	2786	2787	2788	2789	2790	2791	2792	2793	2794	2795	2796	2797	2798	2799	2800	2801	2802	2803	2804	2805	2806	2807	2808	2809	2810	2811	2812	2813	2814	2815	2816	2817	2818	2819	2820	2821	2822	2823	2824	2825	2826	2827	2828	2829	2830	2831	2832	2833	2834	2835	2836	2837	2838	2839	2840	2841	2842	2843	2844	2845	2846	2847	2848	2849	2850	2851	2852	2853	2854	2855	2856	2857	2858	2859	2860	2861	2862	2863	2864	2865	2866	2867	2868	2869	2870	2871	2872	2873	2874	2875	2876	2877	2878	2879	2880	2881	2882	2883	2884	2885	2886	2887	2888	2889	2890	2891	2892	2893	2894	2895	2896	2897	2898	2899	2900	2901	2902	2903	2904	2905	2906	2907	2908	2909	2910	2911	2912	2913	2914	2915	2916	2917	2918	2919	2920	2921	2922	2923	2924	2925	2926	2927	2928	2929	2930	2931	2932	2933	2934	2935	2936	2937	2938	2939	2940	2941	2942	2943	2944	2945	2946	2947	2948	2949	2950	2951	2952	2953	2954	2955	2956	2957	2958	2959	2960	2961	2962	2963	2964	2965	2966	2967	2968	2969	2970	2971	2972	2973	2974	2975	2976	2977	2978	2979	2980	2981	2982	2983	2984	2985	2986	2987	2988	2989	2990	2991	2992	2993	2994	2995	2996	2997	2998	2999	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011	3012	3013	3014	3015	3016	3017	3018	3019	3020	3021	3022	3023	3024	3025	3026	3027	3028	3029	3030	3031	3032	3033	3034	3035	3036	3037	3038	3039	3040	3041	3042	3043	3044	3045	3046	3047	3048	3049	3050	3051	3052	3053	3054	3055	3056	3057	3058	3059	3060	3061	3062	3063	3064	3065	3066	3067	3068	3069	3070	3071	3072	3073	3074	3075	3076	3077	3078	3079	3080	3081	3082	3083	3084	3085	3086	3087	3088	3089	3090	3091	3092	3093	3094	3095	3096	3097	3098	3099	3100	3101	3102	3103	3104	3105	3106	3107	3108	3109	3110	3111	3112	3113	3114	3115	3116	3117	3118	3119	3120	3121	3122	3123	3124	3125	3126	3127	3128	3129	3130	3131	3132	3133	3134	3135	3136	3137	3138	3139	3140	3141	3142	3143	3144	3145	3146	3147	3148	3149	3150	3151	3152	3153	3154	3155	3156	3157	3158	3159	3160	3161	3162	3163	3164	3165	3166	3167	3168	3169	3170	3171	3172	3173	3174	3175	3176	3177	3178	3179	3180	3181	3182	3183	3184	3185	3186	3187	3188	3189	3190	3191	3192	3193	3194	3195	3196	3197	3198	3199	3200	3201	3202	3203	3204	3205	3206	3207	3208	3209	3210	3211	3212	3213	3214	3215	3216	3217	3218	3219	3220	3221	3222	3223	3224	3225	3226	3227	3228	3229	3230	3231	3232	3233	3234	3235	3236	3237	3238	3239	3240	3241	3242	3243	3244	3245	3246	3247	3248	3249	3250	3251	3252	3253	3254	3255	3256	3257	3258	3259	3260	3261	3262	3263	3264	3265	3266	3267	3268	3269	3270	3271	3272	3273	3274	3275	3276	3277	3278	3279	3280	3281	3282	3283	3284	3285	3286	3287	3288	3289	3290	3291	3292	3293	3294	3295	3296	3297	3298	3299	3300	3301	3302	3303	3304	3305	3306	3307	3308	3309	3310	3311	3312	3313	3314	3315	3316	3317	3318	3319	3320	3321	3322	3323	3324	3325	3326	3327	3328	3329	3330	3331	3332	3333	3334	3335	3336	3337	3338	3339	3340	3341	3342	3343	3344	3345	3346	3347	3348	3349	3350	3351	3352	3353	3354	3355	3356	3357	3358	3359	3360	3361	3362	3363	3364	3365	3366	3367	3368	3369	3370	3371	3372	3373	3374	3375	3376	3377	3378	3379	3380	3381	3382	3383	3384	3385	3386	3387	3388	3389
---------------	--	----	--------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

## E. 調整計算で用いる文字式と集合

### (1) 文字式

#### ・ 未知変数

##### エネルギーフロー

$x_{i,j}$ : 行の要素  $i$  から列の要素  $j$  への投入の推計値

$y_j$ : 推計値の列  $j$  における列計

##### フロー間の割合

$q_{i,j}$ : 推計値の列計に対する各要素  $i$  の投入割合

##### 観測値との乖離など表す変数

$r_k$ : 観測値と推計値の比

$w_{k,h}$ : 観測値と推計値の比  $r_k$  の確率分布

#### ・ 既知変数

##### 基準マトリクス情報

$\overline{\xi}_{i,j}$ : 列の要素  $j$  における行の要素  $i$  の投入を表す基準マトリクス

$\overline{\theta}_{i,j}$ : 基準マトリクスの列計に対する各要素  $i$  の投入割合

$\overline{\psi}_j$ : 基準マトリクスの列  $j$  における列計

##### エネルギーフロー観測値に関連する変数

$\overline{b}_k$ : 統計情報種  $k$  の観測情報

$\overline{b}_0$ : マトリクス内で固定されるべき観測値(今回適用する場合は全エネルギー源の一次エネルギー供給量)

$\overline{g}_{i,j,k}$ : 観測値  $\overline{b}_k$  に対応する  $x_{i,j}$  の和を作る行列

$\overline{g}_{0,i,j}$ : 観測値  $\overline{b}_0$  に対応する  $x_{i,j}$  の和を作る行列

##### 設定変数

$\overline{\mu}_{i,j}$ :  $i$  と  $j$  が同じものに 1、それ以外にゼロを持つ行列である。

$\overline{v}_{k,h}$ : 確率分布  $w_{k,h}$  に対する重み

$\overline{u}_k$ :  $\overline{v}_{k,h}$  の対数

$\overline{\tau}_j$ : エネルギー転換活動  $j$  におけるエネルギー転換効率の物理的上限

$\overline{\gamma}_k$ : 観測値  $\overline{b}_k$  に対する重み

## (2) 集合

$i \in I$ : 行の集合

$j \in J$ : 列の集合

$k_1 \in K_1$ : 観測値の中でもエネルギーの投入量や産出量などの絶対量に関する情報(エネルギー転換効率など割合に関する情報はここには含まれない)。

$k_2 \in K_2$ : 推計値間の比に関する情報を持つ観測値の集合

$k \in K$ :  $K_1$  と  $K_2$  の和集合

$j \in I_{pow}$ : 発電プラントの発電活動の集合



## 第7章 全世界炭素・窒素・リン物質勘定表の構築

産業革命以来、社会経済システムで消費する物質フローが増加し、その物質フローの増大は環境や人類に悪影響を及ぼすようになった。そこで、そのような物質フローの制御対策が必要となる。今後の物質フローの見通し、その物質フローの制御対策の効果などのシミュレーション分析のためには、物質フローの現状を世界規模では把握することが求められる。そのような背景を踏まえ、本章では炭素・窒素・リンの物質勘定表の構築を行った。この物質勘定表の作成のために、経済活動内、経済活動と環境とのやりとりのフローを扱う勘定体系を確立した。そして、物質フローと貨幣フローの情報を用いた、物質収支調整計算により財に関連するフローを推計した。その結果をもとに廃棄物の処理、環境とのやりとりに関するフローを推計した。そして、本手法を 2001 年に適用した。その結果、世界全域での炭素・窒素・リンフローが明らかとなった。

### 7.1 はじめに

産業革命以来、人間活動は環境に対して様々な変化を与えてきた。その影響は自然環境中の生物のみならず、人間自身にも及ぶこととなった。このような影響は、環境、人間も含めた生態系の持つ許容量を越えた量の物質を人間が排出することによって発生する。

炭素に関して注目してみると、化石燃料の消費や工業プロセスに伴う二酸化炭素排出量の増大、農業活動に伴うメタン排出量の増大、森林資源として固定されている有機物の減少などは、気候変動やその他の地球環境問題に大きな影響を与えている。

窒素について注目してみると、人間活動は化学肥料の過剰な施肥や、農業・畜産システムの大規模化、燃料の燃焼量増加などは自然界の窒素循環に大きな影響を与えている (Galloway *et al.*, 1995)。窒素酸化物やアンモニアの大気沈着量は、産業革命以前と比べて 3～10 倍に増加した (Galloway *et al.*, 1995)。大気中の窒素酸化物は、対流圏のオゾン生成に寄与しており、光化学スモッグの原因物質の一つである (Bouwman and van Vuuren, 1999)。また、UNEP(2004)によると河川、河口、海岸における窒素濃度は一部の地域で低下しているものの、世界全体としては増加傾向にあり、富栄養化が懸念されている。Howarth *et al.*(1996)によると、北大西洋へ流入する窒素は産業革命以前の 6～10 倍となった。温室効果ガス中に占める亜酸化窒素の温暖化への寄与率は、約 6%とされている (IPCC, 2001)。

リンに注目してみると、窒素と同様に過剰な施肥由来のリンや家畜の糞尿由来のリンは河川や湖沼におけるリン濃度を上昇させ、富栄養化の原因の一つとされている。また、リン肥料の生産のために大量のリン鉱石を消費するため、資源の枯渇も懸念されている。

これらの問題に対処していくためには、物質の循環に対する人為的摂動がもたらす悪影響をできるだけ少なくするような社会経済システムの構築が必須となる。そのため、社会経済システム内を循環する物質と人間活動と環境問題の関わり、環境負荷の現状を把握し、環境対策を評価するツールが必要となる。こうした考え方に基づいて、本研究では、全世界を対象とした人間活動に伴う炭素、窒素、リンのフローを推計する手法を開発した。また、手法の開発と同時に 2001 年に適用し全世界の物質フローの解析を行う。

## 7.2 全世界炭素・窒素・リン物質勘定表

本節では、全世界の人間活動に伴う炭素、窒素、リンのフローを記述する全世界炭素・窒素・リン物質勘定表について述べる。

### 7.2.1 全世界炭素・窒素・リン物質勘定表の概要

全世界炭素・窒素・リン物質勘定表(Global Carbon Nitrogen Phosphorus Account Table)は全世界における人間活動に伴う炭素、窒素、リンのフローを記述する勘定表である。環境と経済部門間、地域内の経済部門間、多国間の経済部門間における炭素、窒素、リンを含有する物質のフローを炭素量、窒素量、リン量単位で記述したものである。

### 7.2.2 全世界炭素・窒素・リン物質勘定表の対象

#### (1) 対象フロー

全世界炭素・窒素・リン物質勘定表では、人間活動により発生するフローを勘定の対象とした。その対象となる人間活動とは、各経済部門における生産、消費、蓄積活動を指す。ただし、森林管理や放牧地管理などの土地利用に関するフロー(例えば、森林の二酸化炭素吸収)は含まないとした。さらに、農地における土壌と地下水間、土壌と表面流水間のフローも人間活動に伴うフローから除外した。

また、人間活動に伴うフロー以外のフローが発生している部位を環境と定義した。

#### (2) 対象物質

前項で定義した人間活動によって生産、消費、廃棄される有機物、化石燃料、肥料を中心とした炭素、窒素、リンを含む物質を対象物質とした。ただし、以下に示す各元素を含む物質については本研究の対象から除外した。(1)炭素を含む物質のうち石灰石やセメントに関連する物質、(2)工業的アンモニア製造によって製造された窒素を含む物質のうち、化学肥料以外の用途のもの、(3)リン鉱石から製造するリンを含む製品のうち、リン肥料以外のもの、である。

本論文では、本項で示した対象物質を産物と呼び、投入、産出といった産物のやりとりをする主体を部門と定義した。

### 7.2.3 全世界炭素・窒素・リン物質勘定表の構成

#### (1) U 表、V 表、T 表

全世界炭素・窒素・リン物質勘定表は、主体別物質投入表(以降 U 表と呼ぶ)、主体別物質産出表(以降 V 表と呼ぶ)、地域間物質移動表(以降 T 表と呼ぶ)の 3 種類の表で構成される。U 表、V 表は地域内の投入産出構造を記述する表であり、行が産物、列が部門で構成され、地域ごとに作成される。T 表は各地域間での貿易量を記述する表であり、行が輸出地域、列が輸入地域で構成され、貿易される産物ごとに作成される。各表の雛形を表 7.8、表 7.9、表 7.10 に示す。

人間活動に伴って発生するフローと U 表、V 表、T 表の関係を模式的に表したものを図 7.1 に示す。ある地域内における人間活動に伴う全てのフローは、部門へ投入されるフローと部門から産出されるフローとして表すことができる。図中青色のフローは産物が部門

へ投入されており、このフローは U 表に記述される。赤色のフローは産物が部門から産出されており、このフローは V 表に記述される。また、緑色のフローは国外での貿易のやり取りを表しており、このフローは T 表に記述される。

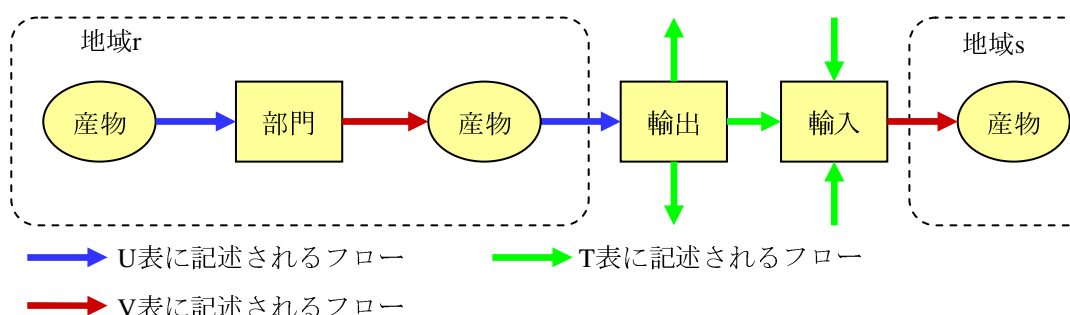


図 7.1 フローと U 表、V 表、T 表の関係

## (2) U 表、V 表、T 表間の関係

U 表、V 表、T 表間の関係を図 7.2 に示す。財、廃棄物、及び生産活動、家計、政府においては投入と産出の物質収支が成り立つ。そのため、U 表、V 表の行の要素である財、廃棄物においては行計が同じ値をとり、同様に列の要素である生産活動、家計、政府においても U 表、V 表の列計が同じ値をとる。

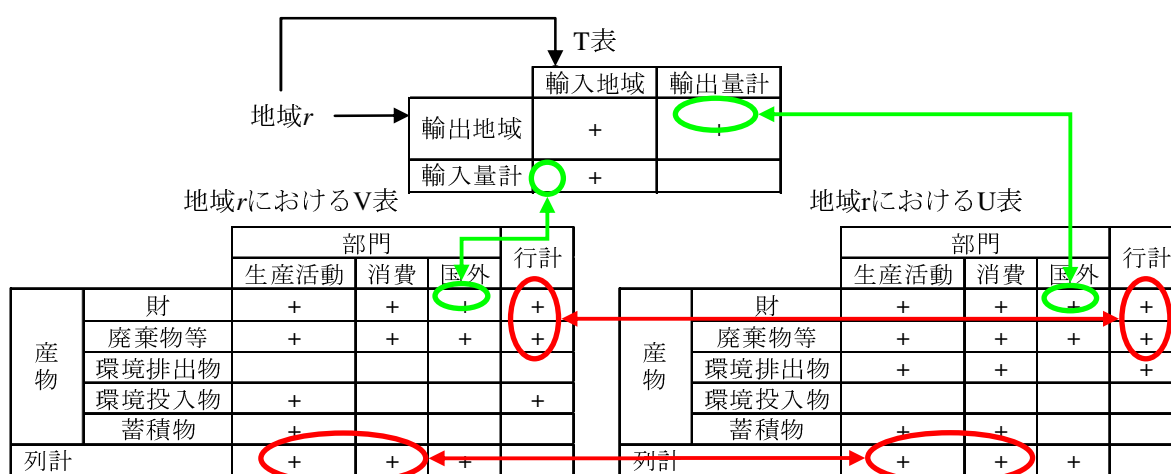


図 7.2 U 表、V 表、T 表間の関係

また、T 表で示される、ある地域  $r$  におけるある財の世界全域への輸出量合計は、地域  $r$  における U 表の財の国外への投入量と一致し、同様に T 表の世界全域からの輸入量合計は、地域  $r$  における V 表の財の国外からの産出量と一致する。

### 7.2.4 産物・部門分類

本研究では、産物と部門を、物質や経済主体によって分類した。産物は、[1]財、[2]廃棄物、副生物(以降廃棄物と呼ぶ)、[3]環境からの投入物(以降環境投入物と呼ぶ)、[4]環境への排出物(以降環境排出物と呼ぶ)、[5]蓄積物の 5 種類に分類した。それぞれの産物の定義

を以下で示す。

- [1] 財とは、部門から産出される主産物で、一つの部門からは一つの主産物を産出すると仮定した。
- [2] 廃棄物とは、財以外として部門から産出され、リサイクル財として、あるいは廃棄物処理の対象物として再び部門に投入される産物である。本研究では、産出された廃棄物は必ずいずれかの部門に投入されると仮定した。
- [3] 環境排出物とは、財以外に部門から産出され、かつ再び部門に投入されずに環境中へ排出される産物である。
- [4] 環境投入物とは、環境から部門に投入される産物である。
- [5] 蓄積物は一年以上部門に残存する産物である。

部門は[1]生産活動、[2]最終需要、[3]国外の 3 種類に分類した。それぞれの部門の定義を以下で示す。生産活動及び消費は産業連関表の定義に従う。また、国外とは産業連関表における輸出、輸入を表す部門で、U 表における国外は輸出、V 表における国外は輸入を表す。

## (1) 産物分類

### 1) 財

本研究で取り扱う 32 の財分類を表 7.1 に示す。表 7.1 で示した財分類のうち、化学・ゴム製品(CRP)、繊維製品(TEX)、肥料(FER) 以外は、Hertel(2005)の 57 経済部門の生産財 57 財のうちの 31 財に対応する。TEX は、Hertel(2005)の布製品(TEX)、革製品(LEA)、着物(WAP)の 3 財を一つの区分 TEX にまとめた。また、Hertel(2005)では CRP に肥料財(窒素肥料、リン肥料)が含まれるが、本研究ではこれに含めない。

表 7.1 財分類

コード	財	コード	財	コード	財
PDR	米	WOL	絹・羊毛	PCR	精穀
WHT	小麦	FRS	林業	SGR	砂糖類
GRO	その他穀類	FSH	漁業	OFD	その他の食物
V_F	野菜・果実・木の実	COA	石炭	B_T	酒・タバコ
OSD	油糧作物	OIL	石油	TEX	繊維製品
C_B	さとうきび	GAS	ガス	LUM	木材
PFB	繊維作物	OMN	鉱物	PPP	紙・パルプ
OCR	その他の作物	CMT	加工肉	P_C	石油・石炭製品
CTL	畜産	OMT	その他の肉類	CRP	化学・ゴム製品
OAP	その他の畜産	VOL	油脂類	FER	肥料
RMK	酪農	MIL	酪農産物		

### 2) 廃棄物

廃棄物の分類は、表 7.2 に示す 15 種類を設定した。

農業廃棄物(CRE)とは、農作物を産出する際に発生する稲藁などの廃棄物である。収穫時木材廃棄物(WRE)とは、木材を収穫した時に林地に放置される木材廃棄物である。

食料廃棄物(FDW)は、食料の加工時の廃棄物、食料の調理時の廃棄物、食べ残し由来の廃棄物である。木材加工廃棄物(WPW)とは、素材を加工し製材やチップを製造する時に発生する廃棄物である。木材消費廃棄物(WCW)とは、家具など木製品を消費し、廃棄されるときに発生する廃棄物である。繊維廃棄物(BCW)とは、布等の製造時に発生する廃棄物や、廃棄される衣類である。化石燃料起源廃棄物(FFS)とは、石油・石炭製品(P\_C)財を原料としたプラスチックなどの廃棄物である。リン廃棄物(PWS)は、リン鉱石からリン肥料を製造した際に発生する廃棄物である。

表 7.2 廃棄物分類

コード	廃棄物	コード	廃棄物	コード	廃棄物
CRE	農業廃棄物	WCW	木材消費廃棄物	FFS	化石燃料起源廃棄物
LDG	家畜糞	PCW	紙廃棄物	RLD	家畜糞尿処理残渣
WRE	収穫時木材廃棄物	BCW	繊維廃棄物	SSW	下水処理汚泥
FDW	食料廃棄物	HDG	人糞	PWS	リン廃棄物
WPW	木材加工廃棄物	NRB	天然ゴム廃棄物	BLQ	黒液

### 3) 環境排出物

環境排出物の分類は表 7.3 に示す 50 種を設定した。

埋め立て廃棄物(DSP)とは、最終的に埋立地などに処分される一般廃棄物や産業廃棄物である。燃焼灰(CMA)は各財や廃棄物を焼却した際に発生する灰である。直接排出人糞(DHM)は、人糞のうち下水処理されずに直接排出される人糞を指す。二酸化炭素(CO2)、メタン(CH4)、窒素酸化物(NOX)、亜酸化窒素(N2O)については、表 7.4 に示すように燃焼する産物や工業プロセスなど排出源ごとに区分を設けた。

表 7.3 環境排出物の分類

コード	環境排出物	コード	環境排出物	コード	環境排出物
DSP	埋め立て廃棄物	DHM	直接排出人糞	NOX	窒素酸化物(8種)
WTE	下水排出	CO2	二酸化炭素(12種)	N2O	亜酸化窒素(9種)
CMA	燃焼灰(4種)	CH4	メタン(13種)	NH3	アンモニア

表 7.4 大気排出物環境排出物の分類

コード	環境排出物	コード	環境排出物
BLCO2	バイオエタノール燃焼二酸化炭素	BQCH4	黒液燃焼メタン
CRCO2	農業廃棄物燃焼二酸化炭素	FBN2O	化石燃料燃焼亜酸化窒素
DGCO2	家畜糞燃焼二酸化炭素	IPN2O	工業過程亜酸化窒素
FFCO2	化石燃料燃焼二酸化炭素	DGN2O	家畜糞燃焼亜酸化窒素
HRCO2	人間呼吸二酸化炭素	AGN2O	農業過程亜酸化窒素
IPCO2	工業過程二酸化炭素	WBN2O	一般・産業廃棄物燃焼 亜酸化窒素
LVCO2	家畜呼吸二酸化炭素	WBSN2O	一般・産業廃棄物燃焼 亜酸化窒素(売電用)
NECO2	化石燃料非燃料使用二酸化炭素	WDN2O	木材燃焼亜酸化窒素
WDCO2	木材燃焼二酸化炭素	CRN2O	農業廃棄物燃焼亜酸化窒素
WSCO2	一般・産業廃棄物燃焼 二酸化炭素(売電用)	BQN2O	黒液燃焼亜酸化窒素
WTCO2	一般・産業廃棄物燃焼 二酸化炭素	MMN2O	家畜糞尿処理亜酸化窒素
BQCO2	黒液燃焼二酸化炭素	AGNOX	農業過程窒素酸化物
CHCH4	木炭製造メタン	CRNOX	農業廃棄物燃焼窒素酸化物
CRCH4	農業廃棄物燃焼メタン	DGNOX	家畜糞燃焼窒素酸化物
DGCH4	家畜糞燃焼メタン	FFNOX	化石燃料燃焼窒素酸化物
DLCH4	化石燃料分配ロスメタン	WDNOX	木材燃焼窒素酸化物
FFCH4	化石燃料燃焼メタン	WSNOX	一般・産業廃棄物燃焼 窒素酸化物(売電用)
IPCH4	工業過程メタン	WTNOX	一般・産業廃棄物燃焼窒素酸化物
LKCH4	化石燃料採掘時メタン	BQNOX	黒液燃焼窒素酸化物
LFCH4	廃棄物埋立地メタン	CRASH	農業廃棄物燃焼灰
LVCH4	家畜反芻メタン	DGASH	家畜糞燃焼灰
MMCH4	家畜糞尿処理メタン	WDASH	木材燃焼灰
RCCH4	水田メタン	WTASH	一般・産業廃棄物燃焼灰
WDCH4	木材燃焼メタン	WSASH	一般・産業廃棄物燃焼灰(売電用)

#### 4) 環境投入物

環境投入物は表 7.5 に示す 5 種類を設定した。

表 7.5 環境投入物

コード	環境投入物
AIRIN	大気中炭素、窒素
BNFIN	生物学的窒素固定
WTRIN	水中有機物
FFLIN	化石燃料
MININ	鉱物

#### 5) 蓄積物

SEEA などに見られる勘定体系では、蓄積を経済活動と捉え、各産物に対して蓄積総量を勘定し、各経済主体の蓄積量を勘定しない方法が一般的である。しかし、本研究では農地や牧草地などの物質収支を推計するため、各産物の蓄積先部門を特定する必要がある。そこで、本研究では蓄積される部門を特定できるように蓄積物という分類を設けた。蓄積物は表 7.6 に示す 12 種類を設定した。木製品(WPDST)は木材(LUM)

財、繊維製品(FBRST)は繊維製品 (TEX) 財、建築物(CNSST)は LUM 財、紙製品(PPRST)は紙・パルプ(PPP)、プラスチック類(PFFST)は石油・石炭製品(P\_C)の蓄積である。収穫時木材残渣蓄積(WREST)は林地に投入、蓄積される産物であり、種苗蓄積(SEDST)、農業廃棄物蓄積(CREST)、肥料蓄積(FERST)、コンポスト蓄積(CMTST)、家畜糞尿蓄積(LDGST)は農地、牧草地に投入、蓄積される産物である。

表 7.6 蓄積物の分類

コード	蓄積物	コード	蓄積物	コード	蓄積物
WPDST	木製品	PFFST	プラスチック類	FERST	化学肥料蓄積
FBRST	繊維製品	SEDST	種苗蓄積	ASHST	燃焼灰蓄積
CNSST	建築物	CREST	農業廃棄物蓄積	CMTST	コンポスト蓄積
PPRST	紙製品	FREST	収穫時木材廃棄物蓄積	LDGST	家畜糞尿蓄積

## (2) 部門分類

生産活動は Hertel(2005)の 57 経済部門に肥料部門を加えた 58 部門、最終需要は政府、家計、固定資本形成、在庫増減に分類する。生産活動の分類を表 7.7 に示す。

表 7.7 生産活動の分類

コード	経済活動部門	コード	経済活動部門	コード	経済活動部門
PDR	米	OMT	肉製品(その他)	OTN	輸送機器
WHT	小麦	VOL	油脂類	ELE	電子機器
GRO	穀類	MIL	酪農産物	OME	機械
V_F	野菜・果実・木の实	PCR	精米	OMF	その他の製造
OSD	油糧作物	SGR	砂糖類	ELY	電力
C_B	さとうきび	OFD	食品加工	WTR	水
PFB	繊維作物	B_T	酒・タバコ	CNS	建設
OCR	その他の作物	TEX	布	TRD	小売・卸売
CTL	畜産(牛科)	WAP	着物	OTP	陸上運輸
OAP	畜産(その他)	LEA	革製品	WTP	水上運輸
RMK	酪農	LUM	木材	ATP	航空運輸
WOL	絹・羊毛	PPP	紙・パルプ	CMN	通信サービス
FOR	林業	P_C	石油・石炭製品	OFI	金融サービス
FSH	漁業	CRP	化学・ゴム製品	ISR	保険
COL	石炭	NMM	鉱物製品	OBS	ビジネスサービス
OIL	石油	I_S	鉄鋼	ROS	娯楽施設
GAS	ガス	NFM	金属	OSG	公共サービス
OMN	鉱物	FMP	金属製品	DWE	住宅
CMT	肉製品(牛科)	MVH	自動車		

### 7.2.5 U、V、T 表の具体的な構造

以上の情報を記述した U 表、V 表、T 表の雛形を表 7.8、表 7.9、表 7.10 に示す。

U 表において"+"で示されるセルは、産物の部門への投入が生じたときに数値が記述されるセルである。空白のセルは概念上数値の入らないセルである。財は生産活動や最終需要などに投入されるものと、在庫への投入、輸出という形態をとって国外へ投入されるものがある。廃棄物は廃棄物処理を行う部門(本研究の部門分類では、公共(OSG)にあたる)や農林水産部門に投入され、投入先の部門で処理される。環境投入物は主として生産活動へ投入される。家計における環境投入物は燃料燃焼時の窒素ガスの取り込みである。蓄積物の

投入は、基準年以前に蓄積された蓄積物の切り崩しにより発生するフローであり、廃棄物処理部門へ投入される。

V 表において"+"で示されるセルは、産物の部門からの産出が生じたときに数値が記述される。U 表と同様に空白のセルは概念上数値の入らないセルである。本研究では、一つの部門からは 1 つの主産物のみを産出すると仮定しているため、財の産出が記述されるセルは財×部門のマトリクスの対角上に位置する。また財は在庫放出による産出、輸入という形態をとって国外からも産出される。廃棄物は生産活動と消費で産出され、さらに輸入という形態をとって国外から産出される。環境排出物、蓄積物は生産活動、消費において産出される。

T 表における"+"で示されているセルは、行の輸出地域から列の輸入地域への貿易が生じたときに数値が記述される。

表 7.8 U 表の構造

部門 産物		生産活動									最終需要		国外	行計
		農業	畜産業・漁業	林業	化石燃料採掘	食料	木材	肥料	化石燃料精製	廃棄物処理	消費	在庫増減		
財	農業	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	畜産業・漁業	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	林業	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	化石燃料採掘	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	食料	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	木材	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	肥料	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
廃棄物	化石燃料精製	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	農業廃棄物	(+)								(+)	(+)			(+)
	糞尿		(+)							(+)	(+)			(+)
	木材廃棄物			(+)										(+)
環境排出物	その他ゴミ					(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)			(+)
	処理汚泥		(+)							(+)				(+)
	埋立廃棄物													
環境投入物	下水排水													
	排出ガス													
	燃焼灰													
環境投入物	環境投入物	(+)	(+)	(+)	(+)					(+)				(+)
蓄積物	製品蓄積													(+)
	農地蓄積	(+)												(+)
	牧草蓄積		(+)											(+)
	林地蓄積			(+)										(+)
	廃棄物蓄積										(+)			(+)
列計		(+)	(+)	(+)	(+)					(+)	(+)		(+)	(+)



表 7.9 V 表の構造

部門 産物		生産活動								最終需要		国外	行計
		農業	畜産業・漁業	林業	化石燃料採掘	食料	木材	肥料	化石燃料精製	廃棄物処理	消費	在庫増減	
財	農業	(+)									(+)	(+)	(+)
	畜産業・漁業		(+)								(+)	(+)	(+)
	林業			(+)							(+)	(+)	(+)
	化石燃料採掘				(+)						(+)	(+)	(+)
	食料					(+)					(+)	(+)	(+)
	木材						(+)				(+)	(+)	(+)
	肥料							(+)			(+)	(+)	(+)
廃棄物	化石燃料精製								(+)		(+)	(+)	(+)
	農業廃棄物	(+)								(+)	(+)		(+)
	糞尿		(+)							(+)	(+)		(+)
	木材廃棄物			(+)									(+)
環境排出物	その他ゴミ					(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)		(+)
	処理汚泥		(+)							(+)	(+)		(+)
	埋立廃棄物									(+)	(+)		(+)
	下水排水									(+)	(+)		(+)
環境投入物	二酸化炭素	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)		(+)
	燃焼灰									(+)	(+)		(+)
環境投入物	環境投入物									(+)			(+)
蓄積物	製品蓄積									(+)			(+)
	農地蓄積												
	牧草蓄積												
	林地蓄積												
	廃棄物蓄積												
列計		(+)	(+)	(+)	(+)					(+)	(+)	(+)	(+)

表 7.10 T 表の構造

		輸入地域								輸出量計 (E)
		オセアニア	アジア	北米	中南米	欧州	旧ソ連	中東	アフリカ	
輸出地域	オセアニア	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	アジア	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	北米	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	中南米	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	欧州	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	旧ソ連	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	中東	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	アフリカ	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
輸出量計(I)		(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)

### 7.3 推計方法

本節では、前節で示した全世界炭素・窒素・リン物質勘定表を推計する上での統計上の問題点を示し、次いで推計方法について示す。

#### 7.3.1 使用する統計情報と問題・推計の方針

物質勘定の推計に用いることができる情報は以下の3種類に分類できる。

- (1) 物量フローに関する情報
- (2) 貨幣フローに関する情報
- (3) それ以外の廃棄物や環境排出物の発生係数などの情報

このうち、(1)の物量フロー情報は FAOSTAT(FAO, 2005)などがある。しかし前述の勘定体系の中でスポット的な情報となる。すなわち、各財については、生産量、輸出量、輸入量、在庫増減量、国内消費量程度しかわからず、投入先部門などはわからない。また、それらの物量フローには矛盾、不一致も見られる。例えば、世界全体の貿易総量が輸出より

も輸入の方が大きくなっているといったことが挙げられる。従って、そういった問題は(2)の貨幣フローに関する情報を基に推計・調整する。

廃棄物、環境排出物のフローは統計情報がまったく得られない。従って、それらのフローについては財のフローと(3)の情報を基に推定する。

### 7.3.2 推計方法の概要

推計方法の概要を図 7.3 に示す。まず、国際機関が公表している各種統計データから物量に関するデータを得て、炭素、窒素、リンに元素換算する。次に、それらの元素換算したデータと金額の情報や各種文献などのデータを用いて、U 表、V 表、T 表の推計を行う。U 表、V 表の推計では、物質収支調整計算、廃棄物処理推計の 2 つの推計方法を用いた。農林水産財の産出や消費に関するフローは物質収支調整計算で推計し、その結果を用いて廃棄物処理に関するフローを推計した。物質収支調整計算とは、物質収支の概念を用いて各部門の投入量、産出量を推計する計算手法である。この物質収支調整計算では農林水産物の T 表も作成される。ただし、肥料、リン鉱石、エネルギー財の T 表は物質収支調整計算では得られないため貿易収支計算を行い、これらの T 表を作成した。

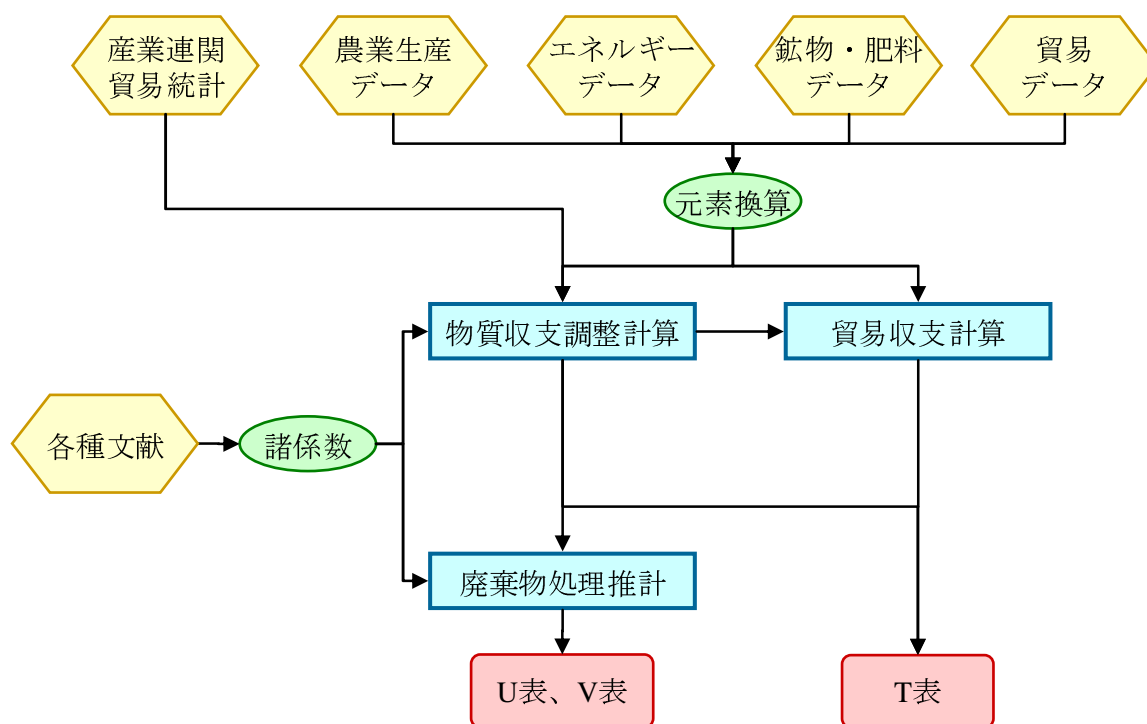


図 7.3 研究概要図

### 7.3.3 農林水産財に関するフローの推計

農林水産財に関連するフローの推計には、物質収支調整計算という計算手法の概念を用いた。本項では、はじめに物質収支調整計算の概要を述べ、次に実際に計算を行った物質収支調整計算の定式化について述べる。

#### (1) 物質収支調整計算の概要

物質収支調整作業とは、物質のフローを考慮し金銭の収支と物量の収支を調整する作業

である。この作業の中心となる概念は「物質密度」であり、1 単位額の財  $i$  に含まれる物質の重量と定義される。前節で示した産物、部門の各項目で物質収支を考慮し各情報に最も整合的な物質密度を求解する。図 7.4 に部門の収支、図 7.5 に産物の収支の概念を示す。部門収支では財、廃棄物、環境投入物の投入と財、廃棄物、環境排出物、蓄積物の産出で収支をとる、産物の収支では生産活動、消費、国外からの産出と、生産活動、消費、国外への投入で収支をとる。これらの投入量、産出量の値については各種生産統計における、報告値を観測値とみなし、この観測量との誤差が最小となる値を推計量となるように定める。

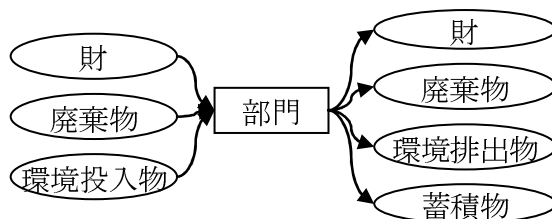


図 7.4 部門収支

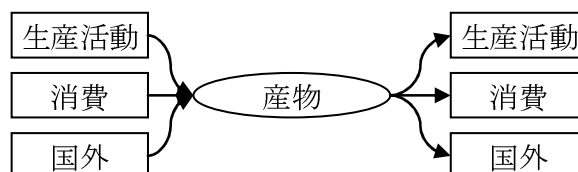


図 7.5 産物収支

## (2) 物質収支調整計算の定式化

### 1) 式中的変数とサフィックス

まず、本項中で用いた文字変数とサフィックスについて説明する。使用した文字変数には5種類ある。第一に、「 $q$ 」で始まる変数はU表、V表中に記述される物量フロー未知変数である。U表、V表のセルと変数の対応関係を表 7.11、表 7.12 に示す。第二に、「 $c$ 」で始まる変数は文献、統計などを通じて外生的に設定した設定係数である。第三に、「 $v$ 」で始まる変数は金銭のフローを表す既知変数である。第四に、「 $s$ 」で始まる変数は統計値などを加工して得られる既知変数である。第五に、上記以外の変数で、 $d$  は物質密度、 $\varepsilon$ 、 $e$  は統計値と推計値の乖離度を表す変数で、ともに未知変数である。また、本研究で用いた主なサフィックスを表 7.13 に示す。

表 7.11 U 表と式中的変数の関係

		部門				行計
		生産活動 $j$	家計・政府 $j$	在庫	国外	
産物	財 $i$	$q_{i,i,r}^{in}$		$q_{i,r}^{sic}$	$q_{i,r}^{exp}$	
	廃棄物 $k$	$q_{wi,k,j,r}$				
	環境排出物 $l$					
	環境投入物 $n$	$q_{ei,n,j,r}$				
	蓄積物 $p$					
列計						

表 7.12 V 表と式中の変数の関係

		部門				行計
		生産活動 $j$	家計・政府 $j$	在庫	国外	
産物	財 $i$	$q_{i,j,r}^{out}$		$q_{i,r}^{stc}$	$q_{i,r}^{imp}$	
	廃棄物 $k$	$qw_{k,j,r}$				
	環境排出物 $l$	$qe_{l,j,r}$				
	環境投入物 $n$					
	蓄積物 $p$	$qq_{p,j,r}$				
列計						

表 7.13 本研究で用いたサフィックスの一覧

サフィックス	説明
$i$	財
$j$	部門
$r, s$	地域
$k$	廃棄物
$l$	環境排出物
$n$	環境投入物
$p$	蓄積物
$f$	データのフロー種(生産・輸入・輸出など)

ここで、

$q_{i,j,r}^{in}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入量

$qei_{n,j,r}$  : 地域  $r$ 、環境投入物  $n$  の部門  $j$  への投入量

$qwi_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入量

$q_{i,j,r}^{out}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出量

$qw_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における廃棄物  $k$  の産出量

$qe_{l,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における環境排出物  $l$  の産出量

$qq_{p,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における蓄積物  $p$  の蓄積量

$q_{i,r}^{exp}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量

$q_{i,r}^{imp}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量

$q_{i,r}^{stc}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量

## 2) 定式化

物質収支調整計算では、以降で示される式群を線形計画問題として記述し未知変数を求解する。以下では各式について説明する。

式(7.1)は部門の収支式を表し、右辺は部門  $j$  への投入量、左辺は部門  $j$  からの産出量を表す。式(4.2)は財の収支を表し、左辺が財  $i$  の投入量、右辺が財  $i$  の産出量を表す。

$$\sum_{i \in I} q_{i,j,r}^{out} + \sum_{k \in K} qw_{k,j,r} + \sum_{l \in L} qe_{l,j,r} + \sum_{p \in P} qq_{p,j,r} = \sum_{i \in I} q_{i,j,r}^{in} + \sum_{k \in K} qwi_{k,j,r} + \sum_{n \in N} qei_{n,j,r} \quad \forall j \in J, r \in R \quad (7.1)$$

$$q_{i,r}^{out} + q_{i,r}^{imp} + q_{i,r}^{stc} = q_{i,r}^{dom} + q_{i,r}^{exp} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (7.2)$$

ここで、 $R$  は地域の集合を、 $I$  は財の集合を、 $J$  は部門の集合を表す。 $K$  は廃棄物の集合、 $N$  は環境投入物の集合、 $L$  は環境排出物の集合、 $P$  は蓄積物の集合を表す。

次に、物質密度を定義する。物質密度とは一単位当たりの物質質量であり、価格の逆数である。そこで、その物質密度、物質フローと貨幣フローの関係を示す。式(7.3)は部門  $j$  における財  $i$  の産出量に関する式で、金額フロー  $\overline{v_{i,r}^{out}}$  に物質密度  $d_{i,r}^{out}$  を乗じる。同様に金額フローに物質密度を乗じることで、式(7.4)は財  $i$  の輸入量、式(7.5)は財  $i$  の輸出量、式(7.6)は在庫増減、式(7.7)は財  $i$  の部門  $j$  への投入量を表す。ここで、 $Q(x)$ をある変数  $x$  が存在するという述語と定義する。

$$q_{i,r}^{out} = \overline{v_{i,r}^{out}} \cdot d_{i,r}^{out} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{out}}\right) \quad (7.3)$$

$$q_{i,r}^{exp} = \overline{v_{i,r}^{exp}} \cdot d_{i,r}^{exp} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{exp}}\right) \quad (7.4)$$

$$q_{i,r}^{imp} = \overline{v_{i,r}^{imp}} \cdot d_{i,r}^{imp} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{imp}}\right) \quad (7.5)$$

$$q_{i,r}^{dom} = \overline{v_{i,r}^{dom}} \cdot d_{i,r}^{dom} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{dom}}\right) \quad (7.6)$$

$$q_{i,j,r}^{in} = \overline{v_{i,j,r}^{in}} \cdot d_{i,j,r}^{in} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,j,r}^{in}}\right) \quad (7.7)$$

ここで、

貨幣の生産、輸出、輸入、地域内消費をそれぞれ  $\overline{v_{i,r}^{out}}$ 、輸出を  $\overline{v_{i,r}^{exp}}$ 、輸入を  $\overline{v_{i,r}^{imp}}$ 、地域内消費を  $\overline{v_{i,r}^{dom}}$ 、部門  $j$  への投入を  $\overline{v_{i,j,r}^{in}}$  とする。それぞれの金額は、税金を含めた額であるとし、輸出は fob、輸入は cif 価格とする。

地域  $r$ 、財  $i$  の生産、輸出、輸入、地域内消費の物質密度をそれぞれ  $d_{i,r}^{out}$ 、 $d_{i,r}^{exp}$ 、 $d_{i,r}^{imp}$ 、 $d_{i,r}^{dom}$ 、部門  $j$  における財  $i$  の投入の物質密度を  $d_{i,j,r}^{in}$  とする。

また、地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出の物質密度を  $dt_{i,r,s}^{exp}$ 、輸入の物質密度を  $dt_{i,r,s}^{imp}$  とし、輸出額、輸入額をそれぞれ、 $\overline{vt_{i,r,s}^{exp}}$ 、 $\overline{vt_{i,r,s}^{imp}}$  とすると以下の式が成り立つ。

$$qt_{i,r,s} = \overline{vt_{i,r,s}^{exp}} \cdot dt_{i,r,s}^{exp} \quad \forall i \in I, s \in S, r \in R \wedge Q\left(\overline{vt_{i,r,s}^{exp}}\right) \quad (7.8)$$

$$qt_{i,r,s} = \overline{vt_{i,r,s}^{imp}} \cdot dt_{i,r,s}^{imp} \quad \forall i \in I, s \in S, r \in R \wedge Q\left(\overline{vt_{i,r,s}^{imp}}\right) \quad (7.9)$$

ここで、 $S$  は地域の集合を表し、 $R$  と等しい。

次に廃棄物について定式化する。式(7.10)は部門  $j$  における廃棄物  $k$  の産出量を表す式である。右辺第一項は財  $i$  の投入に比例して産出する廃棄物  $k$  の産出量であり、財の投入量  $q_{i,j,r}^{in}$  に係数  $\overline{cwg_{i,j,k,r}}_{i,j,k,r}$  を乗じる。右辺第二項は、廃棄物  $k'$  の投入量に比例して産出する廃棄物  $k$  の産出量であり、廃棄物の投入量  $q_{i,j,r}^{in}$  に係数  $\overline{cwg_{k',k,j,r}}_{k',k,j,r}$  を乗じる。

$$qwg_{k,j,r} = \sum_i qj_{i,j,r}^{in} \cdot \overline{cwg_{i,j,k,r}} + \sum_{k'} qwi_{k',j,r} \cdot \overline{cwg_{k',k,j,r}} + \overline{cwgo_{k,j,r}} \quad \forall k \in K, j \in J, r \in R \quad (7.10)$$

ここで、

$\overline{cwg_{i,j,k,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

$\overline{cwg_{k',k,j,r}}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k'$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

$\overline{cwgo_{k,j,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における統計から別途推計する廃棄物  $k$  の産出量

次に、環境排出物について定式化する。式(7.11)は部門  $j$  における環境排出物  $l$  の産出量を表した式である。右辺第一項は財  $i$  の投入に比例して産出する環境排出物  $l$  の産出量であり、財の投入量  $qj_{i,j,r}^{in}$  に係数  $\overline{ceoi_{i,l,j,r}}$  を乗じる。右辺第二項は、財  $i$  の産出に比例して産出する環境排出物  $l$  の産出量であり、財  $i$  の産出量  $qj_{i,j,r}^{out}$  に係数  $\overline{ceoo_{i,l,j,r}}$  を乗じる。右辺第三項は、産物の産出、投入とは関係なく産出される環境排出物  $l$  の産出量を推計する項であり、別途統計値から推計する。

$$qeo_{l,j,r} = \sum_i qj_{i,j,r}^{in} \cdot \overline{ceoi_{i,l,j,r}} + \sum_i qj_{i,j,r}^{out} \cdot \overline{ceoo_{i,l,j,r}} + \overline{ceos_{l,j,r}} \quad \forall l \in L, j \in J, r \in R \quad (7.11)$$

ここで、

$\overline{ceoi_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

$\overline{ceoo_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

$\overline{ceos_{l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における統計から別途推計する排出物  $l$  の産出量

次に廃棄物の投入について定式化する。式(7.12)は廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入量を推計する式で、廃棄物  $k$  の産出量  $qwg_{k,j,r}$  に係数  $\overline{cwg_{j',k,j,r}}$  を乗じる。

$$qwi_{k,j,r} = \sum_{j'} qwg_{k,j',r} \cdot \overline{cwg_{j',k,j,r}} \quad \forall k \in K, j \in J, r \in R \quad (7.12)$$

ここで、

$\overline{cwg_{j',k,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j'$  から産出された廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入割合(-)

次に蓄積物について定式化する。式(7.13)は部門  $j$  における蓄積物  $p$  の産出量を表す式で、財  $i$  の投入量  $qj_{i,j,r}^{in}$  に係数  $\overline{cqq_{i,p,j}}$  を乗じる。

$$qq_{p,j,r} = \sum_i qj_{i,j,r}^{in} \cdot \overline{cq_{i,p,j}} \quad \forall p \in P, j \in J, r \in R \quad (7.13)$$

$\overline{cq_{i,p,j}}$  : 財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い蓄積される蓄積物  $p$  の割合(-)

物質フローの生産、輸出、輸入、地域内消費、在庫増減についてそれぞれ観測値  $\overline{s_{i,r}^{out}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{exp}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{imp}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{dom}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{stc}}$  が存在する場合がある。式(7.14)から式(7.17)はそれぞれ財  $i$  の産出量、輸入量、輸出量、在庫増減量の報告値を  $\overline{s_{i,r}^{out}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{imp}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{exp}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{stc}}$  と推計値との関係を表す式である。

$$q_{i,r}^{out} = \overline{s_{i,r}^{out}} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{out}) \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{out}}\right) \quad (7.14)$$

$$q_{i,r}^{exp} = \overline{s_{i,r}^{exp}} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{exp}) \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{exp}}\right) \quad (7.15)$$

$$q_{i,r}^{imp} = \overline{s_{i,r}^{imp}} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{imp}) \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{imp}}\right) \quad (7.16)$$

$$q_{i,r}^{stc} = \overline{s_{i,r}^{stc}} \cdot (1 + \varepsilon_{i,r}^{stc}) \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{stc}}\right) \quad (7.17)$$

ここで、生産、輸出、輸入、地域内消費、在庫増減の観測値と推計値の乖離を  $\varepsilon_{i,r}^{out}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{exp}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{imp}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{dom}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{stc}$  とする。

式(7.18)は誤差に関する制約式である。

$$1 + \varepsilon_{i,r}^f \leq \overline{c\alpha_{i,r}^f} \quad \forall i \in I, r \in R, f \in F \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^f}\right) \quad (7.18)$$

ここで、

$\overline{c\alpha_{i,r}^f}$  : 誤差  $\varepsilon_{i,r}^f$  に関する許容限界(-)

集合  $F$  は生産"out"、輸出"exp"、輸入"imp"、地域内消費"dom"、在庫増減"stc"を表し、その要素を  $f$  とする。

最後に目的関数を設定する。式(7.19)は目的関数であり、左辺を最小化する。誤差量  $\varepsilon_{i,r}^f$  に重み  $\overline{w\varepsilon_{i,r}^f}$  を乗じたものと、地域  $r$ 、財  $i$  の地域内投入の部門間の物質密度の誤差に重み  $\overline{wj_{i,j,r}}$  を乗じたものを足して目的関数とした。

$$\sum_f \sum_i \sum_r \left( \left| \varepsilon_{i,r}^f \right| \cdot \overline{w\varepsilon_{i,r}^f} \right) + \sum_i \sum_j \sum_r \left( \left| d_{i,j,r}^{in} - d_{i,r}^{dom} \right| \cdot \overline{wj_{i,j,r}} \right) \rightarrow \min \quad (7.19)$$

### (3) 変数設定

農林水産関連フローの推計には7.3.3 項で示した物質収支調整計算を用いた。本項では、7.3.3 項中の(1) 生産統計、農業統計から得られる"s"で始まる既知変数、(2)金銭のフローである"v"で始まる既知変数、(3)文献、統計などを通じて設定した"c"で始まる設定係数、そ

それぞれのデータ設定について述べる。

1) 統計値などを加工して得られる"s"で始まる既知変数

生産統計から得られる産出量、輸入量、輸出量報告値物質フローの生産、輸出、輸入、在庫増減についてそれぞれ観測値  $\overline{s_{i,r}^{out}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{exp}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{imp}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{stc}}$  について示す。上記の変数には、FAOSTAT の(1)Agricultural Production、(2)Commodity Balance、(3)Fish Production、(4)Forestry data、(5)Agriculture and Food Trade から得られる生産量データを元素換算し、さらに本研究の部門・財分類へ統合して、その値を適用した。以下では、農林水産関連財をさらに食料財、家畜財、木材財の3種類に分けてそれぞれのデータの加工方法を示す。ただし、家畜財とは(畜産(CTL)、その他畜産(OAP))、木材財とは(林業(FRS)、木材(LUM)、紙・パルプ(PPP))、食料財とは家畜財、木材財以外の農林水産関連財のことを指す。

i) 食料財の産出量報告値、輸出入量報告値

食料財の産出量報告値、輸出入量報告値は、FAOSTAT から得られる物量(t)データを元素換算し、本研究の財区分に統合した値を設定する。

元素換算については、まず FAOSTAT の食料品目分類と貿易品目分類  $c$  を一度元素換算用の財分類 95 品目(以降、換算用分類と呼び、サフィックスとして  $o$  を与える)に分類し、換算用分類ごとに元素換算する。炭素含有率については、式(7.20)を利用して計算した。食料中の炭水化物、脂質、蛋白質については、香川(2004)の値を用いた。窒素含有率については、香川(2004)より得た窒素－蛋白質換算係数 6.25(-)を用いて換算した。リン含有率についても香川(2004)より得た値を用いた。油類の絞り粕、タバコの元素含有率は、それぞれ Singh *et al.*(2003)、後藤ら(2001)を参考に設定した。その結果を表 7.14 に示す。

$$cont_{e,o} = 0.425 \cdot carb_o + 0.765 \cdot lip_o + 0.53 \cdot prot_o \quad (7.20)$$

ここで、

$carb_o$  : 換算用分類  $o$  中の炭水化物含有率(%)

$lip_o$  : 換算用分類  $o$  中の脂質含有率(%)

$prot_o$  : 換算用分類  $o$  中の蛋白質含有率(%)

$cont_{e,o}$  : 元素換算用財分類  $o$  中の元素  $e$  含有率(-)



表 7.14 本研究で設定した元素含有率(%)

コード	分類	炭素	窒素	リン	コード	分類	炭素	窒素	リン
1	米類	37.0	1.24	0.300	48	エンドウ	38.9	3.47	0.360
2	穀類(米除く)	38.0	1.97	0.350	49	キナコ	49.9	5.68	0.520
3	根菜類	10.8	0.32	0.055	50	しょうゆ	4.3	0.91	0.160
4	果物類	5.3	0.14	0.185	51	味噌	27.4	1.10	0.130
5	野菜類	3.5	0.24	0.050	52	豆腐	7.5	0.94	0.110
6	繊維類	39.2	0.21	0.117	53	バターピーナッツ	60.5	4.08	0.380
7	茶類	34.0	3.46	0.260	54	トマトジュース	2.2	0.10	0.011
8	種類	60.8	3.70	0.540	55	トマトペースト	5.0	0.30	0.037
9	豆類	41.0	3.47	0.360	56	ブロッコリー	4.9	0.69	0.089
10	スパイス類	39.2	1.69	0.150	57	酢	0.1	0.02	0.008
11	油類	76.5	0.00	0.000	58	柑橘	5.6	0.14	0.022
12	油類絞り粕	33.0	7.36	0.640	59	フルーツジュース	5.0	0.11	0.018
13	砂糖	43.8	0.03	0.003	60	ドライフルーツ	35.9	0.43	0.090
14	ゴム	87.0	0.29	0.132	61	残渣	41.6	0.62	0.080
15	肉	15.7	2.90	0.150	62	ココア	44.4	2.96	0.660
16	バター	62.5	0.01	0.015	63	飼料	40.0	3.00	0.500
17	チーズ	35.7	3.56	0.730	64	アルファルファ	1.8	0.26	0.037
18	紛乳	50.6	4.00	0.730	65	脂身	63.5	0.59	0.035
19	牛乳	39.2	0.45	0.090	66	肉製品	30.0	2.11	0.190
20	クリーム	36.8	0.32	0.300	67	かに	7.2	2.08	0.220
21	蜂蜜	35.5	0.03	0.004	68	蒸留酒	25.0	0.00	0.000
22	脂身	63.5	0.03	0.005	69	保存魚	26.0	3.68	0.380
23	魚類	18.6	6.00	0.820	70	缶詰	9.1	2.56	0.160
24	軟体類	10.0	2.72	0.170	71	ジャム	22.6	0.03	0.004
25	海域哺乳類	13.2	3.86	0.500	72	ケーキ	34.7	1.18	0.120
26	海藻類	3.5	0.30	0.350	73	ビスケット	44.7	1.22	0.096
27	米(粳なし)	37.0	1.02	0.094	74	チョコレート	53.5	1.18	0.240
28	小麦	38.0	1.97	0.350	75	インスタントコーヒー	32.0	2.35	0.350
29	木の実類	61.3	3.00	0.245	76	羊毛	47.7	14.40	2.000
30	油糧作物	51.0	4.00	0.500	77	皮革	38.0	7.67	2.000
31	砂糖きび	17.2	0.30	0.300	78	服	52.1	2.30	0.117
32	卵	14.5	1.97	0.200	79	布	51.6	3.80	0.117
33	皮	15.7	2.90	0.150	80	食料財平均	31.8	1.96	0.274
34	臓物	14.8	3.14	0.300	81	石炭	65.0	0.00	0.000
35	タバコ	21.7	2.60	0.200	82	石油	84.0	0.00	0.000
36	飲み物	5.7	0.04	0.010	83	木材	41.0	0.07	0.011
37	粉	38.0	1.44	0.074	84	紙	41.0	0.07	0.011
38	マカロニ	39.2	2.08	0.130	85	石油精製	88.0	0.00	0.000
39	胚芽	46.4	5.12	1.100	86	木炭	41.0	0.00	0.000
40	パン	28.0	1.49	0.083	87	バイオエタノール	88.0	0.00	0.000
41	ペストリー	38.8	1.15	0.075	88	化学製品	52.8	2.30	0.000
42	とうもろこし	38.3	1.37	0.270	89	窒素肥料	0.0	100	0.000
43	ポップコーン	48.2	1.63	0.290	90	リン肥料	0.0	0.00	44.000
44	ウエハース	46.4	1.22	0.063	91	プラスチック	65.0	0.00	0.000
45	タピオカ	37.0	0.02	0.008	92	窒素化学製品	52.5	4.30	0.030
46	サツマイモ	13.0	0.21	0.046	93	石鹼	40.0	4.30	1.000
47	バガス	48.3	0.30	0.300	94	動物	19.3	5.02	0.520

## ii) 家畜財の産出量報告値と輸出入量報告値

家畜財の産出量報告値と輸出入量報告は食料財と同様に、式(7.20)を用いて元素換算

した。ただし、FAOSTAT から得られる家畜貿易量のデータは貿易された頭数で表されている。そのため、元素含有率  $cont_{e,o}$  には、家畜の一頭あたりの体重に各元素の含有率を乗じた値を使用した。家畜中の元素含有率については、農産物貿易の持続性に関する総合人間学的考察(ホームページ)より家畜種に関係なく炭素 19.3%、窒素 0.5%、リン 0.052%とした。家畜 1 頭あたりの体重については Houghton *et al.*(1997)を基にして表 7.15 のように設定した。

表 7.15 家畜一頭あたりの体重

家畜種	体重(kg/hd)	家畜種	体重(kg/hd)
牛	450	ガチョウ	5
水牛	300	七面鳥	12
羊・山羊	40	馬	400
豚	100	ロバ	250
鶏	1.5	ラクダ	500

### iii) 木材財の産出量報告値と輸出入量報告値

木材財の産出量報告値と輸出入量報告値も食料財と同様に、式(7.20)を用いて元素換算した。ただし、FAOSTAT から得られる木材財のデータは体積で表されている。そのため、 $cont_{e,o}$  は密度  $den_o$  に元素含有率を乗じた値を使用した。炭素含有率については日本エネルギー学会(2002)より高位発熱量を得て、式(7.21)を用いて計算した。木材・木材製品種ごとの密度については、山地ら(2000)を基にして表 7.16 のように設定した。窒素・リン含有率については農産物貿易の持続性に関する総合人間学的考察(ホームページ)を基にして表 7.17 のように設定した。

$$cont_{c,o} = (HHV_o + 2.70) \div 0.4571 \quad (7.21)$$

ここで、

$HHV_o$  : 木材・木材製品種  $o$  の高位発熱量(MJ/dry-kg)

表 7.16 木材の密度

木材	密度(t/m <sup>3</sup> )	木材	密度(t/m <sup>3</sup> )
産業丸太(C)	0.70	ベニヤ板	0.75
産業丸太(NC)	0.80	合板	0.65
燃料用丸太(C)	0.63	パーティクルボード	0.65
燃料用丸太(NC)	0.75	ファイバーボード (圧縮)	0.95
木炭	1.00	ハードファイバーボード	0.25
木材チップ	0.70	ファイバーボード (非圧縮)	0.65
木材残渣	0.70	再生紙	0.90
製材(C)	0.55	木材以外のパルプ	0.90
製材(NC)	0.70	木材パルプ	0.90

((C)は針葉樹、(NC)は広葉樹を意味する)

表 7.17 木材財の元素含有率

財	元素含有率(%)		
	炭素	窒素	リン
木材、紙・パルプ	41	0.07	0.011
林業	45	0.07	0.011

## 2) 貨幣のフロー"v"で始まる既知変数

貨幣のフロー"v"で始まる既知変数は GTAP(Hertel, 2005)を用いた。

## 3) 文献、統計などを通じて設定した"c"ではじまる設定係数

文献、統計などを通じて設定した"c"ではじまる設定係数の設定方法を示す。ただし、農林水産関連フローにおいては、 $\overline{c\alpha_{i,r}^f}$  を設定しなかった。

4)  $\overline{cwg_{i,j,k,r}}$  (財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合)

$\overline{cwg_{i,j,k,r}}$  は廃棄物  $k$  のうち食料廃棄物(FDW)、木材加工廃棄物(WPW)、木材消費廃棄物(WCW)、紙廃棄物(PCW)、繊維廃棄物(BCW)、天然ゴム廃棄物(NRB)、黒液(BLQ)、人糞(HDG)について設定した。

## i) 食料廃棄物(FDW)

食料廃棄物(FDW)については、以下の財の消費から発生するとした。すなわち、米(PDR)、小麦(WHT)、その他穀類(GRO)、野菜、果実、木の実(V\_F)、油糧作物(OSD)、さとうきび(C\_B)、繊維作物(PFB)、その他作物(OCR)、漁業(FSH)、加工肉(CMT)、その他の肉類(OMT)、油脂類(VOL)、酪農産物(MIL)、精米(PCR)、砂糖(SGR)、酪農(RMK)、羊毛(WOL)財である。廃棄物の発生割合については、FAOSTAT の(2)Commodity Balanceで廃棄物として計上されている Waste の値を用いた。その値を基にして地域内供給量あたりの廃棄物発生割合を適用した。ただし、バイオエタノールの製造のためにさとうきびやトウモロコシを原料として投入する窒素とリンのフローについては全量が廃棄されると仮定して、 $\overline{cwg_{i,j,k,r}} = 1$  とした。

また、畜産(CTL)、その他畜産(OAP)、食料加工(OFD)、酒、タバコ(B\_T)、繊維製品(TEX)財については、式(7.22)と式(7.23)を用いて設定した。式(7.22)は、地域ごとに食料を消費する時に発生する廃棄物が GDP に比例すると仮定して、地域ごとの重み付け係数を計算する式である。式(7.23)で食料の供給量に、食用部の割合、食料の廃棄率、地域ごとの重みを乗じて食料廃棄率とする式である。食料の非可食部割合  $f\_nfd_i$ 、食料の消費廃棄率  $f\_cons_i$  については、農林水産省総合食料局(2000)、農林水産省統計情報部(2000)を参考にして設定した。

$$f\_adp_{r,t} = \begin{cases} 1.0 & (GDP_{r,t} \geq 12000) \\ (7.0 \times 10^{-6} \cdot GDP_{r,t} + 0.0961) \div 0.263 & (GDP_{r,t} < 12000) \end{cases} \quad (7.22)$$

$$\overline{cwg_{i,j,\"FDW\",r}} = \{f\_nfd_i + f\_cons_i \cdot (1 - f\_nfd_i)\} \cdot f\_adp_{r,t} \quad (7.23)$$

ただし、

$f\_nfd_i$  : 財  $i$  の非可食部割合(-)

$f\_adp_{r,t}$  : 地域  $r$  における食料廃棄重みづけ係数(-)

$GDP_{r,t}$  : 地域  $r$  における国民一人あたりの GDP(\$)

$f\_cons_i$  : 財  $i$  の可食部に対する食料消費廃棄率(-)

#### ii) 木材加工廃棄物 (WPW)

林業(FRS)財の投入に伴う廃棄物の発生割合は、山地ら(2000)より先進国で 0.49、途上国で 0.34 とした。木材(LUM)財の投入に伴う廃棄物の発生割合は、投入先部門がその他の製造(OMF)部門のときは 0.1、建設(CNS)部門のときは 0.143 とした。これらの値は橋本ら(2004)の家具製造に伴うの廃棄物発生率、建築に伴う廃棄物発生率を基に設定し、全年、全元素に適用した。

#### iii) 木材消費廃棄物(WCW)

木材(LUM)財のその他製造(OMF)部門への投入に伴う廃棄物発生率は、ストックとならずにその年に廃棄される割合として橋本ら(2004)より 0.1 とした。また、木材 (LUM) 財の家計(HOU)部門への投入に伴う廃棄物発生率は 1 とした。これらの値は、全年、全元素、全地域に適用した。

#### iv) 紙廃棄物(PCW)、繊維廃棄物(BCW)、天然ゴム廃棄物(NRB)

紙廃棄物(PCW)の発生割合は橋本ら(2004)より 0.8 とした。また、繊維廃棄物(BCW)の発生割合は三菱総合研究所(2001)より 0.795 とした。天然ゴム廃棄物(NRB)の発生割合については 1 とし(全量が廃棄されると仮定し)、全年、全元素、全地域に適用した。

#### v) 黒液(BLQ)

林業(FRS)財、木材(LUM)財の投入に伴う黒液(BLQ)の発生割合は山地ら(2000)より先進国は 0.43、途上国については 0.5 とした。紙・パルプ(PPP)財の投入に伴う BLQ の発生割合は 0.01 とした。この値は、全年、全元素に適用した。

#### vi) 人糞(HDG)

人糞(HDG)の発生割合は、炭素と窒素・リンで値が異なる。炭素については、摂取した食料に対して、呼吸として排出する分を考慮して式(7.24)を用いた。窒素・リンについては摂取した食料の全量が糞尿になると仮定して式(7.25)を用いた。炭素について、単位食料摂取量に対する人糞の発生率  $f\_hd$  は、藤森(2004)より 3.51%とした。この値は、日本国民 1 人 1 日あたりの食物摂取量で人糞量を割った値である。食物摂取量は

厚生労働省の栄養摂取データから、人糞量は下水中の BOD 値から算出した。

① 炭素の場合

$$\overline{cwg i_{i,j,"HDG",r}} = (1 - \overline{cwg i_{i,j,"FDW",r}}) \cdot f\_hd \quad (7.24)$$

② 窒素・リンの場合

$$\overline{cwg i_{i,j,"HDG",r}} = (1 - \overline{cwg i_{i,j,"FDW",r}}) \quad (7.25)$$

ここで、

$f\_hd$  : 単位食料摂取量あたりの人糞の発生割合(-)

5)  $\overline{cwg k_{k',j,r}}$  (廃棄物  $k'$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合)

$\overline{cwg k_{k',j,r}}$  は投入する廃棄物  $k'$  として紙消費廃棄物(PCW)、木材加工廃棄物(WPW)である場合について設定される。

紙消費廃棄物(PCW)と紙消費廃棄物(WPW)は、紙・パルプ(PPP)部門に投入され、リサイクルを行った時に黒液(BLQ)を発生する。そこで、PCW の投入に伴う BLQ 発生率を 0.035 とし(橋本ら, 2004)、WPW 投入に伴う BLQ 発生率は先進国は 0.43、途上国については 0.5 とした。

6)  $\overline{cwo_{k,j,r}}$  (部門  $j$  における統計から推計する廃棄物  $k$  の産出量)

$\overline{cwo_{k,j,r}}$  は廃棄物  $k$  が家畜糞尿(LDG)、農業廃棄物(CRE)、収穫時木材廃棄物(WRE)である場合について設定した。

i) 家畜糞尿(LDG)

家畜糞尿(LDG)は、家畜頭数に、家畜 1 頭あたりの糞尿発生原単位と各元素の含有率を乗じて推計した。表 7.18 に糞発生原単位と元素含有率を示す。糞発生原単位は Johansson *et al.*(1997)から、元素含有率は諏訪(2005)、Bouwman *et al.*(1997)から得た。

表 7.18 家畜の糞尿発生原単位と元素含有率

家畜種	糞尿発生原単位 (t/hd・yr)	糞尿中の元素含有率(%)		
		炭素	窒素	リン
牛	1.10	35.1	5.7	0.087
水牛	1.46	35.1	3.1	0.218
羊	0.18	35.1	5.0	0.218
山羊	0.18	35.1	5.6	0.610
豚	0.22	35.1	5.0	0.087
家禽	0.04	35.1	5.5	0.872
馬・ロバ・ラクダ	0.55	35.1	0.7	0.087
げっし類	0.10	35.1	5.6	0.610
その他	0.51	35.1	5.6	0.218

ii) 農業廃棄物(CRE)

農業廃棄物(CRE)は、農業生産量に農業廃棄物産出率(農業廃棄物産出量(t)/農業生産量(t))と各元素の含有率を乗じて推計した。農業廃棄物発生率と炭素含有率については、Yevich *et al.*(2002)、Ryan *et al.*(1991)、Koopmans *et al.*(1997)などを参考に設定した。農業廃棄物中の窒素含有率は、Houghton *et al.*(1997)より炭素含有率の 1.5%とした。リン含有率については、Byproducts and Unusual Feeds-Feedstuffs 1995 Reference Issue (ホームページ)より値を得た。農業廃棄物産出率とその元素含有率を表 7.19 に示す。

表 7.19 農業廃棄物産出率と元素含有率

収穫物	農業廃棄物 産出率	残渣の元素含有率(%)			収穫物	農業廃棄物 産出率	残渣の元素含有率(%)		
		炭素	窒素	リン			炭素	窒素	リン
米	1.50	41.57	0.62	0.08	菜種	2.53	57.36	0.86	0.10
小麦	1.30	44.19	0.66	0.05	コットン	2.10	60.60	0.91	0.09
大麦	1.60	43.10	0.65	0.07	ココナッツ	1.90	50.89	0.76	0.10
とうもろこし	2.30	44.52	0.67	0.10	ごま	4.00	57.36	0.86	0.10
ライ麦	1.65	40.44	0.61	0.10	豆類	1.90	33.91	0.51	0.14
オート麦	1.30	36.32	0.54	0.06	さとうきび	0.49	43.82	0.66	0.29
キビ	1.20	40.44	0.61	0.10	ジュート	2.00	45.85	0.69	0.10
ソルガム	1.25	34.35	0.52	0.13	麻	1.20	45.85	0.69	0.10
その他穀物	1.51	40.67	0.61	0.10	アバカ	1.99	45.85	0.69	0.10
フルーツ類	2.00	34.57	0.52	0.05	コーヒー	0.92	44.85	0.67	0.10
根菜類	0.50	19.03	0.29	0.06	ココア	55.10	44.85	0.67	0.10
落花生	2.50	40.91	0.61	0.15	お茶	1.20	34.35	0.52	0.10
野菜類	0.40	34.35	0.52	0.04	タバコ	1.20	34.35	0.52	0.10
ひまわり	2.10	60.60	0.91	0.10					

iii) 収穫時木材廃棄物(WRE)

収穫時木材廃棄物(WRE)は木材生産量に収穫時木材廃棄物発生率と元素含有率を乗じて推計した。山地ら(2000)より、生産量あたりの廃棄物発生率 64%を得た。元素含有率については、7.3.3 項(3) 1)iii)で示した木材のものと同じ値を用いた。

7)  $\overline{ceoi}_{i,l,j,r}$  (財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される排出物  $l$  の発生率)

$\overline{ceoi}_{i,l,j,r}$  は、食料財  $i$  の投入に伴う人間の呼吸(HRCO<sub>2</sub>)、木材燃焼由来のガスと燃焼灰(WDCO<sub>2</sub>, WDCH<sub>4</sub>, WDN<sub>2</sub>O, WDASH)、バイオエタノール燃焼由来のガス(BLCO<sub>2</sub>, BLCH<sub>4</sub>, BLNO<sub>x</sub>, BLN<sub>2</sub>O)、について設定した。

i) 人間の呼吸(HRCO<sub>2</sub>)

人間が消費した食料のうち、二酸化炭素として大気へ排出する割合は式(7.26)を用いて推計した。ここでは、人間が摂取した食料中の炭素は糞尿と呼吸によってすべて排出されると仮定している。

$$\overline{ceoi_{i,"HRCO2",j,r}} = (1 - \overline{cwg_{i,j,"FDW",r}}) \cdot (1 - f_{hdg}) \quad (7.26)$$

ii) 木材燃焼に伴うガスと燃焼灰(WDCO<sub>2</sub>、WDCH<sub>4</sub>、WDN<sub>2</sub>O、WDNOX、WDASH)

木材燃焼由来のガスと焼却灰のうち炭素について示す。木材燃焼に伴う二酸化炭素(WDCO<sub>2</sub>)、メタン(WDCH<sub>4</sub>)、燃焼灰(WDASH) (炭素)の産出割合は、式(7.27)、(7.28)、(7.29)で計算した。 $FC\_CO2$ 、 $FC\_CH4$ 、 $FC\_ASH$ を表 7.20 に示す。 $FC\_CO2$ 、 $FC\_CH4$ については、Houghton *et al.*(1997)の値を用いた。 $FC\_ASH$ については、木材の含有エネルギー量が 12.5TG/t(山地ら, 2000)、木材の炭素含有率 0.45 であることを用いて、全エネルギーから  $FC\_CO2$ 、 $FC\_CH4$  を引いた値を設定した。

$$\overline{ceoi_{i,"WDCO2",j,r}} = \frac{FC\_CO2}{FC\_CO2 + FC\_CH4 + FC\_ASH} \quad (7.27)$$

$$\overline{ceoi_{i,"WDCH4",j,r}} = \frac{FC\_CH4}{FC\_CO2 + FC\_CH4 + FC\_ASH} \quad (7.28)$$

$$\overline{ceoi_{i,"WDASH",j,r}} = \frac{FC\_ASH}{FC\_CO2 + FC\_CH4 + FC\_ASH} \quad (7.29)$$

ここで、

$FC\_CO2$  : 燃料を燃焼したときの二酸化炭素排出原単位(tC/TJ)

$FC\_CH4$  : 燃料を燃焼したときのメタン排出原単位(tC/TJ)

$FC\_ASH$  : 木材を燃焼したときの炭素の燃焼灰発生原単位(tC/TJ)

次に、木材燃焼由来のガスと焼却灰のうち窒素、リンについて示す。木材燃焼に伴う窒素酸化物、亜酸化窒素の窒素源はその大部分が空気中の窒素である。よって、窒素の焼却灰の発生率  $\overline{ceoi_{i,l,j,r}}$  を 1 とした。また、リンの燃焼の灰発生率も 1 とした。窒素酸化物、亜酸化窒素の排出割合は式(7.30)、式(7.31)で推計した。 $FN\_NOX$ 、 $FN\_N2O$  は、Houghton *et al.*(1997)より表 7.20 のように設定した。山地ら(2000)より  $F\_EC$  は 12.5、 $F\_NC$  は 0.0007 とした。

$$\overline{ceoi_{i,"WDNOX",j,r}} = FN\_NOX \cdot \frac{F\_EC}{F\_NC} \quad (7.30)$$

$$\overline{ceoi_{i,"WDN2O",j,r}} = FN\_N2O \cdot \frac{F\_EC}{F\_NC} \quad (7.31)$$

ここで、

$FN\_NOX$  : 燃料を燃焼したときの窒素酸化物排出原単位(kgN/TJ)

$FN\_N2O$  : 燃料を燃焼したときの亜酸化窒素排出原単位(kgN/TJ)

$F\_EC$  : 燃料のエネルギー含有率(TJ/t)

$F\_NC$  : 燃料の窒素含有率(kgN/kg)

表 7.20 ガス排出原単位

	<i>FC_CO2</i>	<i>FC_CH4</i> (tC/TJ)	<i>FC_ASH</i>	<i>FN_NOX</i>	<i>FN_N2O</i> (kgN/TJ)
木材燃焼	29.9	0.225	5.875	30.4	2.54
バイオエタノール ・黒液燃焼	30	0.225	0	30.4	2.54

8)  $\overline{ceos_{l,j,r}}$  (部門  $j$  における統計から推計する排出物  $l$  の産出量)

$\overline{ceos_{l,j,r}}$  は水田メタン(RLCH4)、家畜反芻メタン(LVCH4)、家畜呼吸二酸化炭素(LDCO2)について設定した。

i) 水田メタン(RCCH4)

水田から発生するメタンは、FAOSTAT の(7)Land データから得られる米の作付面積に、地域ごとの耕作割合と耕作種ごとのメタン排出原単位を乗じて推計した。Houghton *et al.*(1997)より得た米の作付面積あたりの灌漑、天水、陸稲米の耕作割合を表 7.21 に示す。また、Olivier *et al.*(2001)から得たメタン排出原単位を表 7.22 に示す。



表 7.21 水田の耕作方法の割合(%)

地域	水田の耕作方法(%)			地域	水田の耕作方法(%)		
	灌漑	陸稲	天水		灌漑	陸稲	天水
オーストラリア	100	0	0	ドイツ	100	0	0
ニュージーランド	100	0	0	イギリス	100	0	0
その他オセアニア	100	0	0	ギリシャ	100	0	0
中国	93	2	5	アイルランド	100	0	0
日本	99	1	0	イタリア	100	0	0
韓国	100	0	0	オランダ	100	0	0
インドネシア	72	11	17	ポルトガル	100	0	0
マレーシア	66	12	22	スペイン	100	0	0
フィリピン	61	2	37	スウェーデン	100	0	0
タイ	7	1	92	スイス	100	0	0
ベトナム	53	8	39	その他ヨーロッパ 自由貿易協定	100	0	0
バングラデシュ	22	8	70	その他ヨーロッパ	100	0	0
インド	53	15	32	アルバニア	100	0	0
スリランカ	37	7	56	ブルガリア	100	0	0
その他のアジア	69	1	30	チェコ	100	0	0
カナダ	100	0	0	キプロス	100	0	0
アメリカ	100	0	0	ハンガリー	100	0	0
メキシコ	41	59	0	マルタ	100	0	0
その他北アメリカ	80	20	0	ポーランド	100	0	0
コロンビア	67	23	10	ルーマニア	100	0	0
ペルー	84	16	0	旧ソビエト連邦	100	0	0
ベネゼエラ	90	10	0	トルコ	100	0	0
その他のアンデス 地域統合協定	35	30	35	その他の中東	100	0	0
アルゼンチン	100	0	0	モロッコ	100	0	0
ブラジル	19	75	6	チュニジア	100	0	0
チリ	79	21	0	その他北アフリカ	100	0	0
ウルグアイ	100	0	0	ボツワナ	25	75	0
その他中央アメリカ	10	92	0	南アフリカ	100	0	0
その他中南米	52	48	0	モザンビーク	25	75	0
オーストラリア	100	0	0	タンザニア	3	22	75
ベルギー	100	0	0	ザンビア	25	75	0
デンマーク	100	0	0	ジンバブエ	25	75	0
フィンランド	100	0	0	その他アフリカ	16	57	27
フランス	100	0	0				

表 7.22 水田におけるメタン排出原単位(kg-CH<sub>4</sub>/ha/yr)

地域	耕作方法			地域	耕作方法		
	灌漑	天水	陸稲		灌漑	天水	陸稲
世界	295	161	0	インドネシア	310	80	
タイ	480	150		フィリピン	270		
中国	340			アメリカ	250		
韓国	330			インド		170	

ii) 家畜反芻メタン(LVCH<sub>4</sub>)

家畜の反芻によるメタンは、FAOSTAT の(1)Production データから得られる家畜の保有頭数に、家畜一頭あたりのメタン排出原単位を乗じて推計した。ただし、牛については

地域別のメタン排出原単位があるため、これを使用した。本来、酪農牛と肉用牛ではメタン発生量が異なるが FAOSTAT ではその区分がないため、本研究の原単位は両者の平均値を使用した。メタン排出原単位は表 7.23 に示す Houghton *et al.*(1997)の値を用いた。

表 7.23 家畜の反芻によるメタンの発生原単位(kg-CH<sub>4</sub>/hd/yr)

CH <sub>4</sub> 排出原単位			地域	牛のCH <sub>4</sub> 排出原単位
家畜種	先進国	途上国		
水牛	55	55	北アメリカ	83
羊	8	5	西ヨーロッパ	74
ヤギ	5	5	東ヨーロッパ	69
ラクダ	46	46	オセアニア	61
馬	18	18	ラテンアメリカ	53
その他	10	10	アフリカ、中東	50
豚	1.5	1	アジア	34
			インド亜大陸	36

### iii) 家畜呼吸二酸化炭素(LDCO<sub>2</sub>)

家畜の呼吸については、藤野ら(1997)より糞産出量の 1.61 倍という値を得て、それを適用した。

### 9) $\overline{ceoo_{i,l,j,r}}$ (部門 $j$ における財 $i$ の産出に伴い産出される排出物 $l$ の発生率)

$\overline{ceoo_{i,l,j,r}}$  は、木炭製造メタン(CHCH<sub>4</sub>)に対して設定した。木炭の生産量あたりのメタン排出原単位は、Houghton *et al.*(1997)より得た 1000(kgC/TJ)を使用した。

### 10) $\overline{cwgw_{j',k,j,r}}$ (部門 $j'$ で発生した廃棄物 $k$ の部門 $j$ への投入割合)

$\overline{cwgw_{j',k,j,r}}$  は紙消費廃棄物(PCW)の紙・パルプ(PPP)部門への投入、木材加工廃棄物(WPW)の木材(LUM)部門、PPP 部門への投入について設定した。PCW の PPP 部門への投入は、FAOSTAT から得られる古紙の生産量を紙の消費量で除した値を使用した。WPW の LUM 部門への投入は、先進国のみ 0.04 とした。WPW の PPP 部門への投入は、先進国は 0.3、途上国は 0.01 とした(山本ら, 1999)。

### 11) $\overline{cq_{i,p,j}}$ (財 $i$ の部門 $j$ への投入に伴い蓄積される蓄積物 $p$ の割合)

$\overline{cq_{i,p,j}}$  は、木製品(WPDST)、繊維製品(FBRST)、建築物(CNSST)、紙製品(PPRST)について設定した。木材(LUM)財のその他製造(OMF)部門への投入時の木製品(WPDST)の産出割合を 0.81 とした。LUM 財の建設(CNS)部門への投入時の CNSST の産出割合を 0.857 とした。紙・パルプ(PPP)財の家計(HOU)部門への投入時の PPPST の産出割合を 0.2 とした。ま

た、製品(TEX)財の投入時の産出割合を 0.205 とした。

#### 12) $\overline{w\mathcal{E}_{i,r}^f}$ 、 $\overline{wj_{i,j,r}}$ (誤差に関する重み)

誤差に関する重みについてはそれぞれ、 $\overline{w\mathcal{E}_{i,r}^f}$  に対しては観測値を、 $\overline{wj_{i,j,r}}$  は対応する貨幣フローの値を設定した。

### 7.3.4 化石燃料関連フローの推計

#### (1) 財の投入産出

化石燃料の投入と産出は、第 5 章で推計したエネルギー産出投入表を用いた。エネルギー量を炭素換算するときには、第 5 章で示した係数を用いた。

#### (2) 化石燃料の燃焼由来の環境排出物

##### 1) 化石燃料燃焼メタン(FFCH4)

化石燃料の投入量当たりのメタンの産出割合は、表 7.24 に示す Houghton *et al.*(1997)から得られるメタン排出原単位を使用した。この排出原単位は、全年、全地域に適用した。

表 7.24 化石燃料燃焼によるメタン発生源単位(kg-CH<sub>4</sub>/TJ)

	部門			
	工業	エネルギー産業	その他産業	交通
石炭	10	1	300	10
石油及び石油製品	2	3	10	10
天然ガス	5	1	5	50
その他のバイオマス	30	30	300	

##### 2) 化石燃料燃焼二酸化炭素(FFCO<sub>2</sub>)

化石燃料の投入量された量から前述のメタンの排出量を減じたものを二酸化炭素排出とした。

##### 3) 化石燃料燃焼窒素酸化物(FBNOX)、化石燃料燃焼亜酸化窒素(FBN<sub>2</sub>O)

化石燃料の投入量に原単位を乗じることで窒素酸化物、亜酸化窒素の排出量を計算した。化石燃料の投入量当たりの窒素酸化物と亜酸化窒素の排出原単位は、表 7.25 に示す Houghton *et al.*(1997)から得られるものを使用した。ただし、亜酸化窒素に関しては、Houghton *et al.*(1997)に加えて、Olivier *et al.*(1996)より得られる特殊な扱いをした原単位を使用した(表 7.26)。これらの排出原単位は、全年にわたって適用した。

表 7.25 化石燃料燃焼時の窒素酸化物、亜酸化窒素排出原単位

	窒素酸化物排出 原単位(kg-NO <sub>2</sub> /TJ)				亜酸化窒素排出 原単位(kg-N <sub>2</sub> O/TJ)
	工業	エネルギー産業	その他産業	交通	全部門
石炭	300	300	100	300	1.4
石油及び石油製品	200	200	100	700	0.6
天然ガス	150	150	50	600	0.1
その他バイオマス	100	100	100	100	4

表 7.26 特殊な扱いをした亜酸化窒素の排出原単位

地域	財	原単位(kg-N <sub>2</sub> O/TJ)
日本、アメリカ、カナダ	モーターガソリン	4.00
オーストラリア、ドイツ	モーターガソリン	1.80
旧ソ連	モーターガソリン	1.33
オランダ	モーターガソリン	1.14
全世界	航空燃料	3.40

4) 化石燃料分配ロスメタン(DLCH<sub>4</sub>)、化石燃料非燃料使用二酸化炭素(NECO<sub>2</sub>)

化石燃料の分配時のロスについては、IEA エネルギーバランス表中の **Distribution loss** という項目の値を使用し、国内投入量当たりの分配ロス量の割合を設定した。また、化石燃料の非燃料使用による二酸化炭素排出についても、分配ロスと同様に国内投入量当たりの非エネルギー使用量の割合を設定した。

5) 化石燃料採掘時メタン(LFCH<sub>4</sub>)

化石燃料採掘時メタンの発生割合は、諏訪(2005)の排出量から化石燃料の生産量当たりの採掘時メタンの発生量を各地域計算して、適用した。

## 7.3.5 肥料関連フローの推計

肥料関連フローは FAO(2005)、IFA/FAO/IFDC (1999)、IFA/FAO/IFDC (2002)を用いた。

## 7.3.6 廃棄物処理フローの推計

廃棄物処理フローは、ここまでで推計した結果を用いて推計する。以下では、廃棄物処理に関連するフローとして、(1) 農業廃棄物(CRE)、(2) 収穫時木材廃棄物(WRE)、(3) 家畜糞尿(LDG)、(4) 人糞(HDG)、黒液(BLQ)、(5) 一般・産業廃棄物(定義は(5)で行う)の処理、(6)その他のフローについてそれぞれ説明する。

## (1) 農業廃棄物(CRE)に関するフロー

農業廃棄物(CRE)の処理フローを図 7.6 に示す。CRE は、農業部門に投入され農地へ還元されるものと畜産部門に投入され、家畜の飼料となるものに分かれる。Smil(1999)によると、CRE の畜産部門への投入量は、先進国では CRE の発生量の 20%、途上国では 33% である。本研究では、この値を設定した。農業部門へ再び投入された CRE は、農業廃棄物蓄積(CREST)と、燃焼されるものにわかれる。燃焼された CRE は、農業廃棄物燃焼ガス

(CRCO<sub>2</sub>、CRCH<sub>4</sub>、CRN<sub>2</sub>O、CRNO<sub>x</sub>)と農業廃棄物燃焼灰(CRASH)となる。

CRE の農業部門への投入量あたりの燃焼される量の割合は、Olivier *et al.*(2001)を基に各年、各地域別に設定した(表 7.27 に示す)。

表 7.27 各地域、各年における農業廃棄物燃焼割合(%)

年	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
北米	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
西欧	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	38.0
日本	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
オセアニア	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
東欧	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
旧ソ連	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
中南米1	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.4	17.8	18.2	18.6	19.0	19.4
中南米2	21.8	21.6	21.4	21.2	21.0	20.4	19.8	19.2	18.6	18.0	17.6
アフリカ1	24.0	23.0	22.0	21.0	20.0	20.4	20.8	21.2	21.6	22.0	21.8
アフリカ2	23.2	23.4	23.6	23.8	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	23.8
アフリカ3	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	23.2	22.4	21.6	20.8	20.0	20.2
アフリカ4	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.6	22.2	22.8	23.4	24.0	23.6
アフリカ5	23.1	22.9	22.7	22.5	22.3	22.3	22.4	22.4	22.5	22.5	22.4
中東	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.2	31.4	31.6	31.8	32.0	31.8
南アジア	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.2
東アジア	5.4	5.8	6.2	6.6	7.0	6.6	6.2	5.8	5.4	5.0	4.6
東南アジア	22.8	22.6	22.4	22.2	22.0	22.2	22.4	22.6	22.8	23.0	22.8
その他アジア	9.4	9.5	9.5	9.6	9.7	9.7	9.8	9.9	9.9	10.0	9.9
年	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
北米	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
西欧	36.0	34.0	32.0	30.0	28.0	26.0	24.0	22.0	20.0	15.0	10.0
日本	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
オセアニア	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
東欧	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
旧ソ連	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
中南米1	19.8	20.2	20.6	21.0	19.0	20.0	19.0	19.0	21.0	21.0	21.0
中南米2	17.2	16.8	16.4	16.0	16.0	15.0	16.0	16.0	15.0	16.0	16.0
アフリカ1	21.6	21.4	21.2	21.0	23.0	17.0	24.0	24.0	19.0	20.0	14.0
アフリカ2	23.6	23.4	23.2	23.0	22.0	22.0	22.0	23.0	22.0	23.0	23.0
アフリカ3	20.4	20.6	20.8	21.0	20.0	21.0	20.0	21.0	22.0	21.0	20.0
アフリカ4	23.2	22.8	22.4	22.0	22.0	21.0	22.0	24.0	22.0	21.0	23.0
アフリカ5	22.2	22.1	21.9	21.8	21.8	20.3	22.0	23.0	21.3	21.3	20.0
中東	31.6	31.4	31.2	31.0	31.0	31.0	32.0	31.0	31.0	31.0	30.0
南アジア	2.4	2.6	2.8	3.0	3.0	1.0	3.0	4.0	3.0	2.0	3.0
東アジア	4.2	3.8	3.4	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0
東南アジア	22.6	22.4	22.2	22.0	23.0	23.0	23.0	22.0	22.0	21.0	21.0
その他アジア	9.7	9.6	9.5	9.3	9.7	8.7	9.7	9.7	9.0	8.3	8.7
年	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
北米	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
西欧	8.0	7.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
日本	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
オセアニア	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	
東欧	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	
旧ソ連	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	
中南米1	20.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	
中南米2	18.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	
アフリカ1	14.0	22.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	
アフリカ2	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	
アフリカ3	27.0	26.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	
アフリカ4	26.0	24.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	
アフリカ5	22.5	23.8	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	
中東	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	
南アジア	4.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
東アジア	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
東南アジア	20.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	
その他アジア	8.7	9.3	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	

また、Smil(1999)によると、農業廃棄物の炭素燃焼効率は 90%である。本研究ではこの値を用いて、CRASH の発生割合は燃焼する CRE の 10%とした。農業廃棄物燃焼のメタン(CRCH<sub>4</sub>)の排出量は、7.3.4 項(2)1)で示した排出原単位を使用して推計した。また、農業廃棄物燃焼由来の二酸化炭素(CRCH<sub>2</sub>O)は、CRE の燃焼される量から燃焼灰とメタンで排出される量を引いた値とした。農業廃棄物燃焼の窒素酸化物(CRNOX)、農業廃棄物燃焼由来の亜酸化窒素(CRN<sub>2</sub>O)は、諏訪(2005)より得た排出係数 0.121、0.007 を用いて推計し、農業廃棄物燃焼の窒素酸化物(CRNOX)、農業廃棄物燃焼の亜酸化窒素(CRN<sub>2</sub>O)とならない窒素分は燃焼灰となるとした。リンについては全量が燃焼灰になるとした。

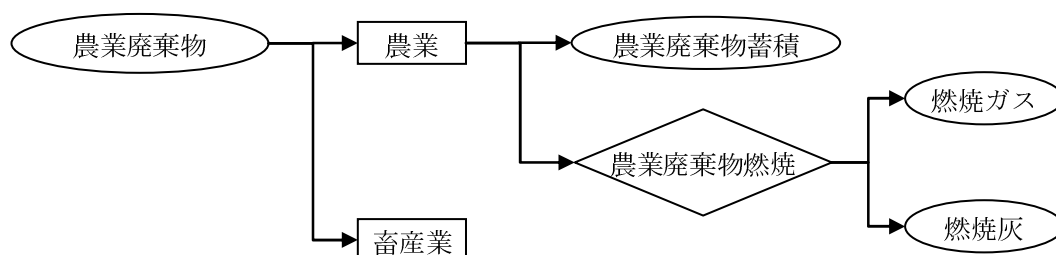


図 7.6 農業廃棄物の処理フロー

## (2) 収穫時木材廃棄物(WRE)に関するフロー

収穫時木材廃棄物(WRE)については産出量全量が林業に再び投入され、収穫時木材廃棄物蓄積(WREST)になるとした。

## (3) 家畜糞尿(LDG)に関するフロー

家畜糞尿(LDG)の処理フローを図 7.7 に示す。家畜の糞尿は、一部が家計(HOU)に投入され、燃料として使用され、家畜糞尿燃焼ガス(DGCO<sub>2</sub>、DGCH<sub>4</sub>、DGN<sub>2</sub>O、DGN<sub>2</sub>OX)、家畜糞尿燃焼灰(DGASH)となる。家計に投入されない分は畜産部門に投入され、家畜糞尿処理される。糞尿処理された一部は亜酸化窒素、メタンとして排出され、家畜糞尿処理残渣(RLD)は、畜産部門に蓄積されるものと農業部門で蓄積されるものに分かれる。

燃焼ガス、燃焼灰の推計方法は7.3.6 項(1)で示した農業廃棄物(CRE)と同様の方法をとった。家計と畜産部門への投入割合、処理の方法の割合については表 7.32 に示す(Houghton *et al.*, 1997)。

家畜の糞尿処理過程からのメタン(MMCH<sub>4</sub>)排出量については、家畜頭数にメタン排出原単位を乗じて推計した。牛、水牛、豚については、Houghton *et al.*(1997)の式(7.32)を用いてメタン排出原単位を推計した。Houghton *et al.*(1997)から得た原単位、変換効率とパラメータをそれぞれ表 7.28、表 7.29、

表 7.30 に示す。家畜の糞尿処理過程からの亜酸化窒素(MMN<sub>2</sub>O)については、表 7.31 の排出割合を乗じて推計した。Van Drecht *et al.*(2001)によると、処理残渣の投入先と投入量は、先進国の場合農業部門と畜産部門で 1:1、途上国は 5:95 の割合となる。本研究ではこの値を設定した。

$$MMCH4_o = VS_o \cdot 365 \cdot B_o \cdot 0.67 \cdot \sum_{ms} \sum_{clm} MCF_{ms,clm} \cdot MS_{o,ms} \quad (7.32)$$

ここで、

$MMCH4$  : 家畜種  $o$  の家畜 1 頭あたりの糞尿処理過程からのメタン排出原単位(kg/hd)

$VS_o$  : 1 日あたりの家畜種  $o$  の糞尿排出量(kg/day)

$B_o$  : 最大メタン発生係数( $m^3/kg$ )

$MCF_{ms,clm}$  : 糞尿処理  $ms$ 、気候  $clm$  におけるメタン変換効率(-)

$MS_{o,ms}$  : 家畜種  $o$  ごとの糞尿処理割合(-)(表 7.32)

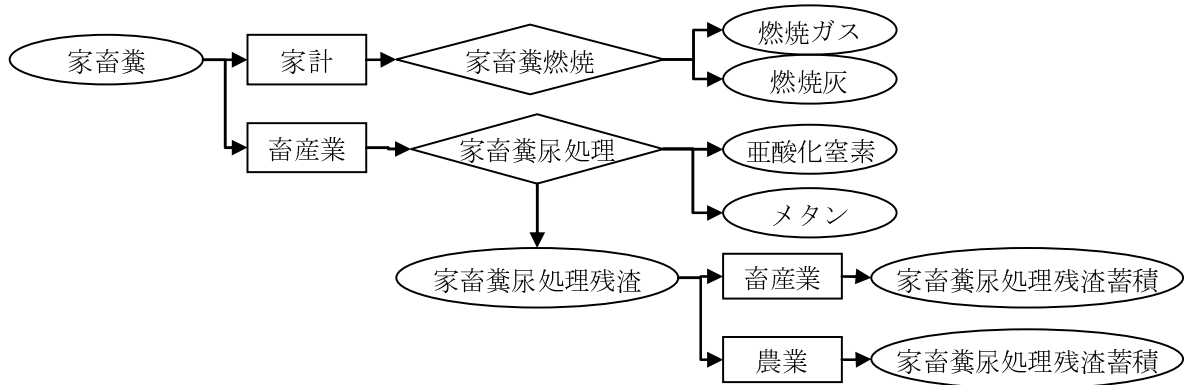


図 7.7 家畜糞尿の処理フロー

表 7.28 家畜種ごとの糞尿処理過程からのメタン排出原単位(kg-CH<sub>4</sub>/hd/yr)

先進国	家畜種	気候			途上国	家畜種	気候		
		寒冷	温暖	熱帯			寒冷	温暖	熱帯
	羊	0.19	0.28	0.37		羊	0.1	0.16	0.21
	ヤギ	0.12	0.18	0.23		ヤギ	0.11	0.17	0.22
	ラクダ	1.59	2.38	3.17		ラクダ	1.28	1.92	2.56
	馬	1.39	2.08	2.77		馬	1.09	1.64	2.18
	その他	0.76	1.14	1.51		その他	0.6	0.9	1.19
	家禽	0.078	0.117	0.157		家禽	0.012	0.018	0.023

表 7.29 気候、糞尿処理別のメタン変換効率

気候	MCF(%)						
	嫌気性 貯水池	水処理 (タンク)	土地へ散布	貯蔵	放牧地 (処理なし)	燃料用	その他
寒冷	90	10	0.1	1	1	0	5
温暖	90	35	0.5	1.5	1.5	0	5
熱帯	90	65	1	3	2	0	5

表 7.30 牛、豚、水牛に関するパラメータ

家畜種	地域	パラメータ		家畜種	地域	パラメータ	
		B(m <sup>3</sup> /kg)	VS(kg)			B(m <sup>3</sup> /kg)	VS(kg)
牛	北アメリカ	0.205	3.8	豚	北アメリカ	0.45	0.5
	西ヨーロッパ	0.205	3.9		西ヨーロッパ	0.45	0.5
	東ヨーロッパ	0.205	3.4		東ヨーロッパ	0.45	0.5
	オセアニア	0.205	3.25		オセアニア	0.45	0.5
	ラテンアメリカ	0.115	2.7		ラテンアメリカ	0.29	0.3
	アフリカ	0.115	1.7		アフリカ	0.29	0.3
	中東	0.115	1.7		中東	0.29	0.3
	アジア	0.115	2.55		アジア	0.29	0.3
	インド亜大陸	0.115	2		インド亜大陸	0.29	0.3
水牛	西ヨーロッパ	0.1	3.9				
	東ヨーロッパ	0.1	3.9				
	ラテンアメリカ	0.1	3.9				
	中東	0.1	3.9				
	アジア	0.1	3.9				
	インド亜大陸	0.1	3.1				

表 7.31 家畜糞尿処理過程からの亜酸化窒素排出割合

	嫌気性 貯水池	水処理 (タンク)	貯蔵	放牧地 (処理なし)	その他
亜酸化窒素 排出割合(%)	0.1	0.1	2	2	0.5



表 7.32 地域、家畜種別の家畜糞尿の処理方法(%)

地域	家畜種	家畜糞尿の処理割合 (%)						
		嫌気性 貯水池	水処理 (タンク)	土地へ散布	貯蔵	放牧地 (処理なし)	燃料用	その他
北アメリカ	牛	5	12	18.5	18.5	42	0	4
	家禽	5	4	0	0	1	0	90
	羊	0	0	0	2	88	0	10
	豚	25	50	0	18	0	0	7
	その他	0	0	0	0	92	0	8
西ヨーロッパ	牛	0	50.5	12	11.5	20.5	0	5.5
	家禽	0	13	0	1	2	0	84
	羊	0	0	0	2	87	0	11
	豚	0	77	0	23	0	0	0
	その他	0	0	0	0	96	0	4
東ヨーロッパ	牛	4	28.5	0.5	59.5	6.5	0	1
	家禽	0	28	0	0	1	0	71
	羊	0	0	0	0	73	0	27
	豚	0	29	0	0	27	0	44
	その他	0	0	0	0	92	0	8
オセアニア	牛	0	0	0	0	100	0	0
	家禽	0	0	0	0	3	0	97
	羊	0	0	0	0	100	0	0
	豚	55	0	0	17	0	0	28
	その他	0	0	0	0	100	0	0
ラテンアメリカ	牛	0	0.5	31	0.5	67.5	0	0.5
	家禽	0	9	0	0	42	0	49
	羊	0	0	0	0	100	0	0
	豚	0	8	2	51	0	0	39
	その他	0	0	0	0	99	0	1
アフリカ	牛	0	0	6.5	1.5	89.5	0	2.5
	家禽	0	0	0	0	81	0	19
	羊	0	0	0	1	99	0	0
	豚	0	7	0	93	0	0	0
	その他	1	0	0	0	99	0	0
近東及び地中海	牛	0	0	2.5	1	77	18	1.5
	家禽	0	1	0	0	71	0	28
	羊	0	0	0	0	100	0	0
	豚	0	32	0	68	0	0	0
	その他	0	0	0	0	100	0	0
アジア及び極東	牛	3	2	18	7	27	43	0
	家禽	1	2	0	0	44	1	52
	羊	0	0	0	0	83	0	17
	豚	1	38	1	53	0	7	0
	その他	0	0	0	0	95	0	5

## (4) 人糞(HDG)、黒液(BLQ)に関するフロー

黒液(HDG)と黒液(BLQ)の処理フローを図 7.8 に示す。

BLQ は、一部がエネルギー利用され、残りが下水処理されるとした。エネルギー利用量は、IEA のエネルギーバランス表から得た。BLQ を燃焼したときの黒液燃焼ガス(BLCO<sub>2</sub>、BLCH<sub>4</sub>、BLN<sub>2</sub>O、BLNO<sub>x</sub>)の産出量の推計方法については、7.3.4 項で示した排出原単位を使用した。ただし、燃焼灰は発生しないと、燃焼ガスとならない窒素分は下水処理されるとした。また、リンは全量下水処理されるとした。

HDG については、まず都市部と農村部の人口比率を用いて、産出された HDG を都市から産出された人糞と農村部から産出された人糞に配分する。都市人口と、農村人口は

UN(2001)より得た。そして、途上国の農村部で産出された HDG は、全量が家計へそのまま投入される、と仮定した。家計に投入された HDG は、全量が直接排出人糞(DHM)となるとした。途上国における都市部、先進国における都市部・農村部では、産出された HDG 全量が公共(OSG)部門へ下水処理という形で投入されるとした。また、下水処理汚泥(SSW)は再び公共部門へ投入される。地域ごとの都市・農村別の下水道へのアクセス割合はWHO/UNICEF(ホームページ)より得た。下水処理における各元素の回収率は中国地方整備局(ホームページ)を参考にして表 7.33 のように設定した。

表 7.33 衛生施設の元素除去率

	除去率(%)	
	下水道	その他の衛生施設
炭素	0.95	0.75
窒素	0.3	0
リン	0.4	0

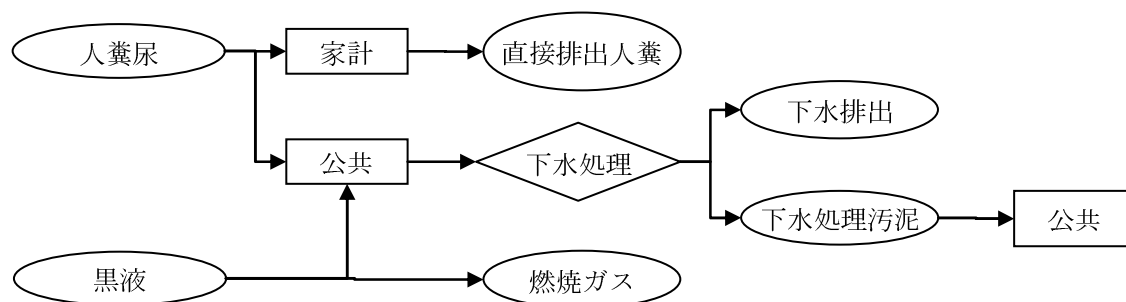


図 7.8 人糞と黒液の処理フロー

#### (5) 一般・産業廃棄物に関するフロー

一般・産業廃棄物として、食料廃棄物(FDW)、木材加工廃棄物(WPW)、木材消費廃棄物(WCW)、紙廃棄物(PCW)、繊維廃棄物(BCW)、化石燃料起源廃棄物(FFS)、天然ゴム廃棄物(NRB)を扱う。図 7.9 に一般・産業廃棄物処理フローを示す。

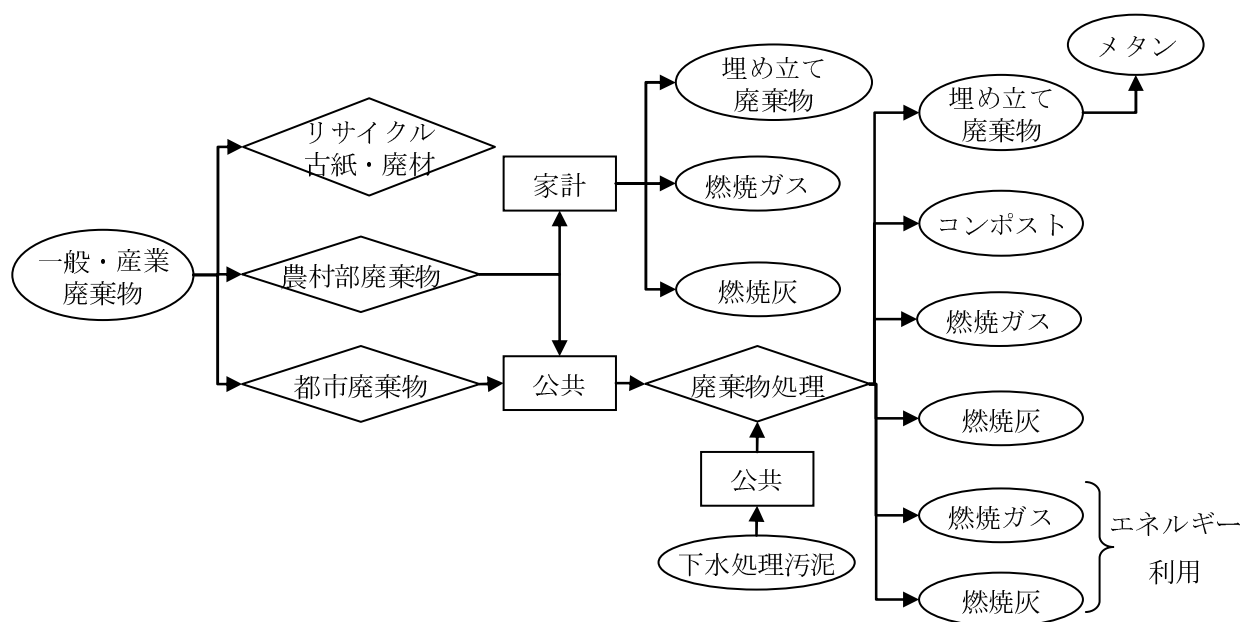


図 7.9 一般・産業廃棄物処理フロー

WPW と PCW の一部はリサイクルされる。残りの一般・産業廃棄物については、7.3.6 項(4)で示した方法と同様に農村部と都市部の一般・産業廃棄物に配分する。途上国における農村部一般・産業廃棄物は全量が家計へ投入される、と仮定した。先進国における農村部の一般・産業廃棄物のうち燃焼されるものは家計(HOU)部門へ、残りは公共(OSG)部門に投入される。都市部の一般・産業廃棄物は全量が OSG 部門に投入され廃棄物処理される、と仮定した。

家計へ投入された一般・産業廃棄物は、途上国では全量を埋め立て廃棄物(DSP)として産出される。先進国では一部を燃焼し、残りは直接排出すると仮定した。先進国における燃焼量は、Olivier *et al.*(2001)の値を使用した。一般・産業廃棄物燃焼ガス(WTCO<sub>2</sub>、WTCH<sub>4</sub>、WTNO<sub>x</sub>、WTN<sub>2</sub>O)、一般・産業廃棄物燃焼灰(WTASH)の産出量の推計方法は、7.3.6 項(1)で示した農業廃棄物の燃焼と同様の方法をとった。

一方、公共部門に投入され、廃棄物処理されるものは、埋め立て廃棄物(DSP)、コンポスト蓄積(CMTST)、一般・産業廃棄物燃焼ガス(WSCO<sub>2</sub>、WTCO<sub>2</sub>、WSCH<sub>4</sub>、WTCH<sub>4</sub>、WSNO<sub>x</sub>、WTNO<sub>x</sub>、WSN<sub>2</sub>O、WTN<sub>2</sub>O)、一般・産業廃棄物焼却灰(WSASH、WTASH)となる。エネルギー利用の焼却については、IEA のエネルギーバランス表からデータを得た。堆肥化(コンポスト)については、先進国に限り 10% が堆肥化されるものとした。埋め立て率については、Houghton *et al.*(1997)の値を参考にし、表 7.34 に示すように設定した。焼却処分量については、総量からその他の処分量を差し引いた残りが全量焼却されると仮定した。それぞれの燃焼ガス、燃焼灰の産出量の推計方法は、7.3.6 項(1)で示した農業廃棄物の燃焼と同様の方法をとった。

表 7.34 各地域の廃棄物埋立率

地域	埋立率(%)	地域	埋立率(%)	地域	埋立率(%)
オーストラリア	100	アルゼンチン	80	その他ヨーロッパ	44
ニュージーランド	100	ブラジル	80	アルバニア	87
その他オセアニア	100	チリ	80	ブルガリア	87
中国	80	ウルグアイ	80	チェコ	87
日本	38	その他中央アメリカ	80	キプロス	87
韓国	60	その他中南米	80	ハンガリー	87
インドネシア	80	オーストリア	40	マルタ	87
マレーシア	80	ベルギー	43	ポーランド	87
フィリピン	80	デンマーク	20	ルーマニア	87
タイ	80	フィンランド	77	旧ソビエト連邦	94
ベトナム	80	フランス	46	トルコ	66
バングラデシュ	80	ドイツ	66	その他の中東	80
インド	60	イギリス	90	モロッコ	80
スリランカ	80	ギリシャ	93	チュニジア	80
その他アジア	80	アイルランド	100	その他北アフリカ	80
カナダ	75	イタリア	88	ボツワナ	80
アメリカ	62	オランダ	67	南アフリカ	80
メキシコ	80	ポルトガル	86	モザンビーク	80
その他北アメリカ	80	スペイン	85	タンザニア	80
コロンビア	80	スウェーデン	44	ザンビア	80
ペルー	80	スイス	23	ジンバブエ	80
ベネゼエラ	80	その他ヨーロッパ	44	その他アフリカ	80
その他のアンデス 地域統合協定	80	自由貿易協定			

一方、公共部門から産出された DSP の一部は廃棄物埋立地メタン(LFCH4)となる。埋立地から発生するメタンは Houghton *et al.*(1997)に示される式(7.33)を用いて推計した。DSP に、廃棄物管理に関する係数  $MCF$ 、ガス化変換係数  $DOC_F$ 、ガス中のメタン率  $F$  を乗じることで推計される。 $MCF$  は 0.6、 $DOC_F$  は 0.56、 $F$  は 0.5 とした。

$$LFCH4 = LDF \cdot MCF \cdot DOC_F \cdot F \quad (7.33)$$

ここで、

$LFCH4$ : 廃棄物埋立地から発生するメタン(tC)

$LDF$ : 埋め立て廃棄物量(tC)

$MCF$ : 廃棄物管理に関する係数(-)

$DOC_F$ : ガス化変換係数(-)

$F$ : 埋立地から発生するガス中に占めるメタンの割合(-)

#### (6) その他のフロー

その他のフローとして、農業過程のガス( $AGN_2O$ 、 $NH_3$ )について示す。農業過程からのガス産出量は、化学肥料の投入量と家畜の糞尿の投入量に、Houghton *et al.*(1997)より得られるガス変換率を乗じて推計した。その変換率を表 7.35 に示す。

表 7.35 農業過程から発生するガスの変換率

	変換率(%)	
	亜酸化窒素	アンモニア
化学肥料	1.25	10
有機肥料	1.25	20

## 7.4 結果

本研究で作成した、炭素、窒素、リンに U 表、V 表をそれぞれ表 7.36-表 7.41 に示す。

表 7.36 炭素 U 表(TgC/年)

部門 産物		生産活動										消費 在庫		国外	計
		農業	畜産・漁業	林業	鉱業	食料	木材	肥料	化石燃料精製	廃棄物処理	その他	消費	在庫		
財	農業	117	249	1	1	716	8	71	0	9	59	340	0	189	1,760
	畜産・漁業	13	26	0	0	164	1	4	0	2	18	99	0	16	343
	林業	24	14	81	5	74	433	48	7	140	302	0	54	1,182	1,182
	鉱業	4	8	1	137	46	28	177	3,329	23	2,737	165		2,367	9,023
	食料	3	33	0	0	168	2	10	0	10	58	424	3	158	871
	木材	2	1	0	2	20	200	11	0	20	173	98	0	200	726
	肥料	10	2	0	6	20	9	76	1	17	71	55	11	85	362
	化石燃料精製	52	37	6	24	41	24	335	525	59	1,614	763		524	
	廃棄物処理	1	1	0	2	3	1	1	0	4	29	111	2	14	169
廃棄物	農業廃棄物	1,833	746												2,580
	糞尿	400	561							25		71			1,057
	木材廃棄物			453											453
	その他ゴミ						107			1,118		71			1,295
環境排出物	処理汚泥									20					20
	埋立廃棄物														0
	下水排水														0
	CO2														0
環境投入物	CH4														0
	燃焼灰														0
環境投入物		4,199	906	1,623	6,734										13,462
蓄積物	製品蓄積														0
	農地蓄積														0
	林地蓄積														0
	廃棄物蓄積														0
計		6,658	2,584	2,167	6,912	1,252	811	733	3,856	1,313	4,899	2,499	16	3,608	33,305

表 7.37 炭素 V 表(TgC/年)

部門 産物		生産活動										消費 在庫		国外	計
		農業	畜産・漁業	林業	鉱業	食料	木材	肥料	化石燃料精製	廃棄物処理	その他	消費	在庫		
財	農業	1,594												167	1,760
	畜産・漁業		334											9	343
	林業			1,141										41	1,182
	鉱業				6,664							8		2,367	9,039
	食料					718								147	865
	木材						567							159	726
	肥料							255						85	340
	化石燃料精製								3,480			0		524	
	廃棄物処理									155				11	166
廃棄物	農業廃棄物	2,580													2,580
	糞尿	1	1,022	0	0	2	0	1	0	1	3	26			1,057
	木材廃棄物			453											453
	その他ゴミ	20	17	110	8	302	183	100	1	42	250	262			1,295
環境排出物	処理汚泥									20					20
	埋立廃棄物									622		57			679
	下水排水									5					5
	CO2	344	972	9	169	228	60	376	375	357	4,481	1,966			9,336
環境投入物	CH4	27	78	1	70	1	0	0	0	187	1	4			371
	燃焼灰									58					58
環境投入物															0
蓄積物	製品蓄積	0	0	0	0	1	0	0	0	2	9	173			186
	農地蓄積	1,693													1,693
	林地蓄積			453											453
	廃棄物蓄積	400	161	0	0	0	0	0	0	19	0	11			590
計		6,658	2,584	2,167	6,912	1,252	811	733	3,856	1,313	4,899	2,499	8	3,509	33,198

表 7.38 窒素 U 表(TgN/年)

部門 産物		生産活動										消費 在庫		国外	計
		農業	畜産・漁業	林業	鉱業	食料	木材	肥料	化石燃料精製	廃棄物処理	その他	消費	在庫		
財	農業	4.8	12.4	0.0	0.0	25.6	0.3	0.9	0.0	0.3	2.4	13.6		9.9	70.3
	畜産・漁業	0.7	0.7	0.0	0.0	6.9	0.1	0.3	0.0	0.1	1.2	4.3		3.2	17.5
	林業	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1		0.0	0.2	0.5		0.1	2.0
	鉱業														0.0
	食料	0.1	1.5	0.0	0.0	5.9	0.1	0.4	0.0	0.4	2.2	14.9		7.0	32.4
	木材	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2		0.3	1.2
	肥料	75.8	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	30.3	116.1
廃棄物	化石燃料精製 廃棄物処理	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	1.0		0.1	1.9
	農業廃棄物	27.5	11.2												38.7
	糞尿	27.9	111.2							28.3		19.8			187.3
	木材廃棄物 その他ゴミ 処理汚泥			0.8			0.2			16.1		1.6			0.8
										4.2					17.9
環境排出物	埋立廃棄物														4.2
	下水排水														0.0
	N2O														0.0
	NH3														0.0
	NOX														0.0
環境投入物	N2	50.9	76.8	2.7	0.4	0.1	0.1	86.2	9.7	0.1	20.8	1.1			0.0
															248.9
蓄積物	製品蓄積														0.0
	農地蓄積														0.0
	林地蓄積														0.0
	廃棄物蓄積														0.0
計		187.8	217.7	3.7	0.5	38.8	1.8	88.0	9.7	49.7	27.6	57.1	5.8	50.9	739.3

表 7.39 窒素 V 表(TgN/年)

部門 産物		生産活動										消費 在庫		国外	計
		農業	畜産・漁業	林業	鉱業	食料	木材	肥料	化石燃料精製	廃棄物処理	その他	消費	在庫		
財	農業	61.5											0.0	8.8	70.3
	畜産・漁業		15.5									0.0		1.9	17.5
	林業			1.9								0.0		0.1	2.0
	鉱業					25.8									0.0
	食料											0.0		6.5	32.3
	木材						1.0							0.3	1.2
	肥料							85.8						30.3	116.1
廃棄物	化石燃料精製 廃棄物処理										1.9			0.1	1.9
	農業廃棄物	38.7													38.7
	糞尿	1.3	148.6	0.1	0.1	2.7	0.4	1.1	0.0	0.7	3.2	29.0			187.3
	木材廃棄物 その他ゴミ 処理汚泥	0.2	0.5	0.8	0.0	10.0	0.4	0.3	0.0	0.2	1.6	4.6			0.8
				0.2						4.2					17.9
環境排出物	埋立廃棄物										14.8	1.4			16.2
	下水排水										24.1				24.1
	N2O	1.1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1			2.5
	NH3	13.2	8.6	0.0											21.8
	NOX	1.0	0.3	0.0	0.4	0.2	0.1	0.6	9.6	0.7	20.7	1.5			35.1
環境投入物	N2	2.8	0.0		0.0	0.0		0.0		4.2	0.0	8.2			15.3
															0.0
蓄積物	製品蓄積	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6			0.6
	農地蓄積	28.5													28.5
	林地蓄積			0.8											0.8
	廃棄物蓄積	39.6	43.2	0.0				0.0		0.7		11.8			95.3
計		187.8	217.7	3.7	0.5	38.8	1.8	88.0	9.7	49.7	27.6	57.1	0.0	47.9	730.4

表 7.40 リン U 表(TgP/年)

部門 産物		生産活動										消費 在庫		国外	計
		農業	畜産・漁業	林業	鉱業	食料	木材	肥料	化石燃料精製	廃棄物処理	その他	消費	在庫		
財	農業	0.9	2.3	0.0	0.0	4.7	0.1	0.2	0.0	0.1	0.4	2.7		1.7	13.2
	畜産・漁業	0.0	0.1	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6		0.4	2.3
	林業	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0		0.0	0.1	0.1		0.0	0.5
	鉱業							15.0						3.9	19.0
	食料	0.0	0.3	0.0	0.0	1.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.4	2.7		1.2	5.8
	木材	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0		0.1	0.2
	肥料	13.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	2.8	17.8
廃棄物	化石燃料精製 廃棄物処理	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2		0.0	0.3
	農業廃棄物	3.2	1.3												4.5
	糞尿	3.2	12.4							4.8		2.6			23.1
	木材廃棄物 その他ゴミ 処理汚泥			0.1			0.0					0.3			0.1
										2.8					3.2
環境排出物	埋立廃棄物									1.1					1.1
	下水排水														0.0
環境投入物	燃焼灰														0.0
		6.5	7.0	0.7	15.0										0.0
蓄積物	製品蓄積														29.2
	農地蓄積														0.0
	牧草蓄積														0.0
	林地蓄積														0.0
	廃棄物蓄積														0.0
計		27.5	24.1	0.8	15.0	6.8	0.4	15.3	0.0	8.9	1.1	9.3	0.9	10.1	120.2

表 7.41 リン V 表(TgP/年)

部門 産物		生産活動										消費 在庫		国外	計
		農業	畜産・漁業	林業	鉱業	食料	木材	肥料	化石燃料精製	廃棄物処理	その他	消費	在庫		
財	農業	11.5										0.0		1.5	13.0
	畜産・漁業		1.9									0.0		0.2	2.1
	林業			0.5								0.0		0.0	0.5
	鉱業				15.0							0.0		3.9	19.0
	食料					4.6						0.0		1.1	5.7
廃棄物	木材						0.2					0.0		0.0	0.3
	肥料							15.0						2.7	17.8
	化石燃料精製														
	廃棄物処理										0.3			0.0	0.3
	その他														
環境排出物	農業廃棄物	4.5										5.3			4.5
	糞尿	0.1	16.3	0.0	0.0	0.4	0.1	0.2	0.0	0.1	0.5				23.1
	木材廃棄物	0.0	0.1	0.0	0.0	1.7	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	0.8			0.1
環境投入物	埋立廃棄物														3.2
	下水排水														3.7
	燃焼灰														0.0
蓄積物	製品蓄積	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1			0.1
	農地蓄積	4.0	0.2												4.2
	牧草蓄積			0.1											0.1
	林地蓄積	7.3	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	2.2			15.3
	廃棄物蓄積	0.0	0.0		0.0	0.1		0.0		0.9	0.0	0.1			1.1
計		27.5	24.1	0.8	15.0	6.8	0.4	15.3	0.0	8.9	1.2	9.0	0.0	9.7	118.6

#### 7.4.1 世界全体の物質フローの概観

炭素、窒素、リンの世界全体のフローの概観を示す。以下の図はそれぞれ、炭素、窒素、リンのフローの概観を表している。図中の丸いボックスは物質を、四角いボックスは部門を表している。それぞれの矢印はの太さは物質フローの量に比例しており、図中の数字はそれぞれ Tg 元素量を表している。

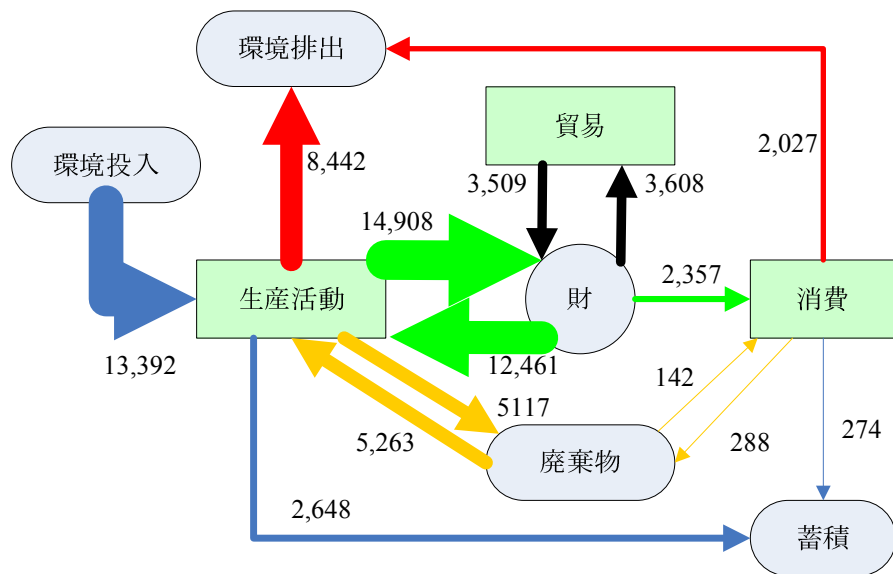


図 7.10 世界全体の炭素フロー(TgC/年)

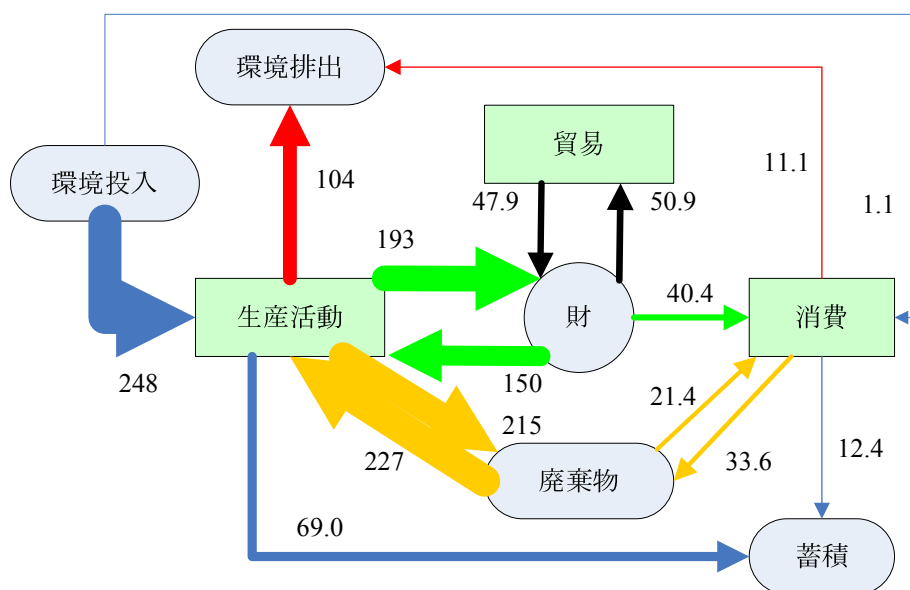


図 7.11 世界全体の窒素フロー(TgN/年)

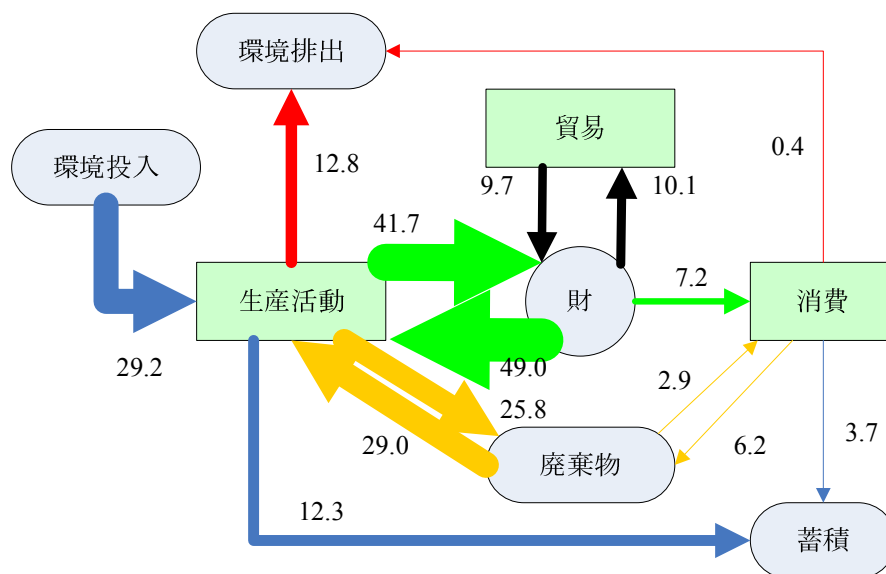


図 7.12 世界全体のリンフロー(TgP/年)

#### 7.4.2 炭素フローの概観

まず炭素についてみる。図からは生産活動の産出や投入の物量が多いことがわかる。環境投入物 13,392TgC ある。財の市場への投入と産出はそれぞれ合計で 14,908TgC、12,461TgCであった。そして最終消費の消費量は 2357TgCであった。生産活動、消費活動は 5,117TgC、288TgCの廃棄物を発生し、5,263TgCが生産活動へ戻り処理される。この処理のうち大部分は家畜の糞尿や農業廃棄物、木材残渣である。生産活動、消費活動はそれぞれ 8,442TgC、2,027TgCを環境へ排出する。そして、蓄積へまわるのは大部分が生産活動からであり 2,648TgCであった。消費活動における財の投入量あたりの環境排出量が (2027 Tg/2358 Tg=0.86)多いのが炭素フローの特徴である。窒素やリンはこの割合がそれぞれ 0.22、0.062(図 7.11、図 7.12)である。これは炭素の場合人間が食料を消費したときに大部分が二酸化炭素になるのに対して、窒素やリンは排泄物となり一度廃棄物処理部門へ



回収されること、消費活動に投入される財のうち炭素は化石燃料が大きな割合を占めていることがその原因と考えられる。

財の産出の内訳は表 7.37 からわかるが、鉱業からの産出がもっとも大きく、6,664TgC であった。二番目に大きかったのは石油精製品で 3,480TgC であり、三番目は農産物の 1594TgC であった。鉱業、石油製品はいずれも化石燃料起源のフローであり、財のやりとりを炭素で見ると化石燃料が大きな割合を占めていることがわかる。

廃棄物について注目してみると(表 7.37)、農業廃棄物が 2,580TgC となっており、最も大きなフローである。次いでその他廃棄物、糞尿が大きく、1,295TgC、1,057TgC であった。環境排出物について見ると、二酸化炭素が全体の 89%を占めており、9,336TgC であった。食料を摂取した後の排出、化石燃料の燃焼による排出が二酸化炭素の排出源である。環境投入物では、化石燃料が全体の半分近くを占め、6734TgC、次いで農業が 31%を占めて 4199TgC であった。その農業の投入のうち、61%の 2580TgC は農業廃棄物となる。

#### 7.4.3 窒素フローの概観

次に窒素について見てみる。炭素と同様に生産活動の投入と産出フローが大きいことがわかる。生産活動は環境から 248TgN を投入し、環境への排出物が 104TgN、財の産出が 193TgN、財の投入が 150TgN であった。廃棄物は 215TgN 発生し、227TgN が投入されている。窒素フローと炭素フローを比較したときに大きく異なるのは、生産活動における廃棄物の発生と投入フローが大きいことである。環境投入物の量に対する廃棄物の発生量の割合は  $0.92(=227/248)$  であり、炭素フローは 0.38 であった。これは、家畜糞尿の量が窒素では多いが炭素では多くないことがその原因と考えられた。一方、生産された財のうち消費へ回るのは 40.4TgN であり、消費活動は 33.6TgN の廃棄物を発生し、21.4TgN が再び消費活動で使われている。このうち、大部分はインドなどの家畜糞尿の燃料使用などによるものであった。

次に、表 7.39 を見てみる。財の産出は化学部門からの産出、すなわち化学肥料の生産が最も大きく 85.8TgN であった。二番目に大きかったのは、農産物で 61.5TgN であった。ほとんどすべての化学肥料 75.7TgN は農業へ投入されている。廃棄物について見ると排泄物の割合が大きいことがわかる。その中でも、畜産からの産出が大きく 148.6TgN であった。また、廃棄物の投入量も大きかったが、これは発生した糞尿は一度処理するという勘定体系にしたためである。実際の家畜糞尿の発生量は 78TgN であり、畜産からの産出の約半量である。環境排出物について見ると、NO<sub>x</sub> が最も大きく、35.1TgN であった。そして、排出源は主としてその他部門であり(20.7TgN)、これは化石燃料の燃焼によるものであった。環境投入物について見ると、化学部門が 86.2TgN と最も大きく全体の 35%を占めていた。次いで大きかったのが畜産部門の 76.8TgN であり、31%を占めていた。三番目に大きかったのは農業であり、50.9TgN であった。

#### 7.4.4 リンフローの概観

最後にリンについてみてみる。リンフローも炭素、窒素と同様に生産活動の投入と産出フローが大きい。環境投入物が 29.2TgP であり、41.7TgP が財として産出され、49.0TgP が投入される。リンは、リン鉱石を化学部門が投入して、それを農業に投入するという二段

階のステップを踏むフローを定義しているので、財の産出フローは環境投入よりもやや大きなフローとなっている。また、生産活動は廃棄物を 25.8TgP 発生し、29.0TgP を投入し、環境排出物を 212.8TgP 産出している。一方、消費についてみると、7.2TgP が財として投入され、6.2TgP の廃棄物を発生し、2.9TgP が再び投入されている。この廃棄物の投入は窒素同様に糞尿の燃料使用によるものである。環境への直接排出は 0.4TgP と小さかった。

次に、表 7.41 を見てみる。財の産出が最も大きいのは化学、鉱業からのもので 15.0TgP であった。これらはリン鉱石と、リン鉱石由来のリン肥料である。廃棄物の発生量についてみると、畜産部門由来の排泄物が最も大きく 16.3TgP であった。人間由来の排泄物が二番目に大きく 5.3TgP であった。窒素のフローのところでも述べたように、家畜由来の糞尿については、糞尿の発生とその処理がダブルカウントされており、実際の発生量は 8.2TgP であった。環境投入物について見ると、鉱業が 51%と大きな割合を占め、15.1TgP 投入している。次いで、畜産が環境投入物全体の 24%である 7.0TgP、3 番目が農業が 22%となる 6.5TgP を環境投入物として投入していた。

#### 7.4.5 各元素のフローの特徴

本項では、各元素の特徴を見てみる。前項までで示した各フローの概観から、いくつか指標を見てみる。第一に、環境投入物の投入量に占める消費活動の財の投入量の比、第二に、生産活動と消費活動の環境排出物の排出量の比、第三に財の産出量に対する貿易フローの比である。

表 7.42 フローの割合一覧

	(消費活動の財投入) (環境投入物)	(消費活動の環境排出) (生産活動の環境排出)	(貿易) (財の産出)
炭素	18%	24%	24%
窒素	16%	11%	25%
リン	25%	3%	24%

まず、環境投入物の投入量に占める消費活動の財の投入量の比について見てみる。炭素、窒素、リンはそれぞれ 18%、16%、25%であった。環境から採取してきた物質のうち最大でも 1/4 程度しか消費活動で消費されないことが明らかとなった。最もこの割合が小さいのは窒素であり、16%であった。次に、生産活動と消費活動の環境排出物の排出量の比についてみてみると、元素間で大きく差があることがわかる。炭素は最もその比が大きく 24%であり、窒素は 11%、リンは 3%であった。リンの消費活動由来の排泄物はいったん公共部門に回収されるので、ここでは非常に小さな値となっている。それに対して、炭素の場合、化石燃料の燃焼、人間の呼吸という排出源があるため、環境排出の割合が他の元素と比べて大きな割合になったと思われる。窒素は、燃料の燃焼による NOx があるが、農畜産業由来の排出に比べると、大きな割合ではないためにリンよりは大きい値であるものの炭素よりは小さな比になったと考えられる。最後に貿易について見ると、元素間による差はほとんどなく 25%程度であった。

#### 7.4.6 貿易フロー

表 7.43 は炭素の貿易マトリクスを表している。ここでは食料、木材、化石燃料の合計値が Tg で書かれている。また、ここでは地域を 12 に集約している。西欧圏内の貿易で、501TgC であった。これは世界全体の 12%を占める。さらに、西欧の輸入総量は世界全体の貿易総量の 31%を占める 1,291TgC であった。輸出総量を見ると中東が大きく 910TgC であり、世界全体の 22%を占めた。純輸入(輸入－輸出)に着目すると大きな西欧で純輸入量が大きく、中東で純輸出が大きかった。純輸入の値の絶対の大きさで見ると日本は単一国ながら 310TgC となり比較的大きな値を示した。

次に窒素の貿易マトリクス(表 7.44)について見てみる。表中の値は食料、木材、肥料の合計値であり GgN で表されている。炭素の貿易マトリクスと同様に地域を 12 に集約して表示している。窒素は北米圏内の貿易、西欧、東欧から西欧への貿易量が大きかった。また、輸入総量でも北米、西欧が大きいことがわかる。輸出について見ると、西欧、東欧、CIS が大きな値を示した。順輸入についてみた場合、CIS の純輸出が大きく 6,862GgN であった。純輸入量が大きかったのは西欧、中南米であり、それぞれ 3,219GgN、3,223GgN であった。

最後にリンの貿易マトリクス(表 7.45)について見てみる。表中の値は食料、木材、リン鉱石、リン肥料の合計値であり、GgP で表されている。リンの貿易マトリクスは炭素や窒素とは大きく異なり、アフリカの輸出が大きく 2994GgP となり、全体の 31%を占めた。アフリカの主な輸出先は西欧、中南米、北米であった。アフリカはリン鉱石の産出が大きく、特にモロッコ、チュニジアは世界有数のリン鉱石の産出国、輸出国であることが知られている。そのことがこのような結果となった主たる要因であると考えられる。純輸入について見るとアフリカが大きな純輸出国となっており、西欧が大きな純輸入国となっていた。

表 7.43 炭素の貿易マトリクス

(unit: TgC)													輸出
	オセアニア	東アジア	日本	東南アジア	南アジア	北米	中東	中南米	西欧	東欧	CIS	アフリカ	
オセアニア	5	45	91	13	12	4	4	7	28	1	0	3	212
東アジア	2	66	40	17	5	16	2	4	11	1	1	2	168
日本	1	7	0	1	0	3	0	0	1	0	0	0	15
東南アジア	12	71	70	53	26	14	5	3	18	2	1	4	278
南アジア	0	1	1	3	3	4	3	3	4	0	1	2	25
北米	2	29	34	11	3	197	10	60	47	2	2	10	407
中東	7	190	222	89	32	161	32	10	143	4	1	19	910
中南米	0	13	4	3	47	221	7	88	59	2	5	7	458
西欧	2	11	5	5	4	84	13	7	501	22	6	20	679
東欧	0	1	0	0	0	2	2	1	46	17	4	1	74
CIS	0	16	7	1	1	9	25	9	212	92	98	3	473
アフリカ	0	28	6	5	12	106	13	20	221	3	1	29	443
輸入	32	479	480	201	145	821	115	211	1,291	146	119	101	4,142
純輸入	-180	310	465	-77	120	414	-795	-247	612	72	-353	-342	

表 7.44 窒素の貿易マトリクス

(unit: GgN)													
	オセアニア	東アジア	日本	東南アジア	南アジア	北米	中東	中南米	西欧	東欧	CIS	アフリカ	輸出
オセアニア	64	181	184	242	49	66	57	44	77	3	3	81	1,051
東アジア	58	407	297	584	97	211	12	102	92	7	13	56	1,936
日本	13	73	0	390	9	8	1	1	6	0	0	5	505
東南アジア	256	335	215	944	195	437	43	18	144	12	19	87	2,704
南アジア	52	37	10	205	85	112	72	7	102	4	12	62	760
北米	156	738	714	410	150	3,318	226	2,384	491	23	49	393	9,052
中東	475	104	80	939	388	1,265	147	76	106	13	20	331	3,944
中南米	38	465	82	92	22	569	149	1,200	749	29	27	190	3,611
西欧	40	154	138	201	61	723	264	486	7,315	306	120	595	10,402
東欧	1	28	5	16	40	478	240	418	2,393	561	37	92	4,311
CIS	3	175	10	397	106	831	973	2,019	1,368	905	498	386	7,671
アフリカ	25	28	47	38	17	407	43	79	779	12	9	398	1,882
輸入	1,179	2,725	1,783	4,457	1,219	8,425	2,227	6,834	13,620	1,876	809	2,676	47,831
純輸入	129	789	1,278	1,753	459	-628	-1,717	3,223	3,219	-2,436	-6,862	794	

表 7.45 リンの貿易マトリクス

(unit: GgP)													
	オセアニア	東アジア	日本	東南アジア	南アジア	北米	中東	中南米	西欧	東欧	CIS	アフリカ	輸出
オセアニア	35	31	29	119	11	8	10	6	13	1	1	13	277
東アジア	103	207	163	154	312	9	2	3	15	1	2	5	976
日本	0	8	0	4	0	2	0	0	1	3	0	0	19
東南アジア	4	51	20	57	17	19	9	4	24	2	4	19	228
南アジア	1	5	1	21	17	7	16	1	14	3	1	9	96
北米	137	113	161	46	75	123	42	446	78	3	5	71	1,301
中東	46	2	25	107	297	8	132	165	274	37	3	12	1,107
中南米	12	70	12	16	3	112	26	212	121	24	5	34	647
西欧	2	23	17	11	5	31	26	57	856	59	18	72	1,178
東欧	0	1	1	1	1	3	10	13	125	30	6	8	199
CIS	0	6	1	0	1	6	13	0	377	129	73	7	615
アフリカ	264	20	43	147	216	322	186	499	985	221	31	59	2,994
輸入	605	538	472	685	955	650	472	1,406	2,881	514	148	310	9,637
純輸入	328	-438	453	457	859	-652	-635	759	1,704	314	-467	-2,684	

#### 7.4.7 推計結果の誤差値

7.3 で示した物質収支調整計算における推計結果の誤差値を示す。図 7.13 に各地域の財の産出量に関する誤差、図 7.14 に輸入量に関する誤差を示す。地域  $r$ 、財  $i$  の誤差  $\varepsilon_{i,r}^{out}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{imp}$  を財  $i$  について平均を取り、地域別に集約化したものを図 7.13、図 7.14 に示した。図中のプロットは誤差の地域平均値を、縦バーは  $1\sigma$  の範囲を示す。まず、産出量に関する誤差について見ると、アフリカで-20%、それ以外の地域は $\pm 10\%$ 以下であった。輸入量に関する誤差については、アフリカ、ラテンアメリカ、西欧、東欧で-20%～-30%であったが、それ以外の地域は $\pm 10\%$ 以下であった。

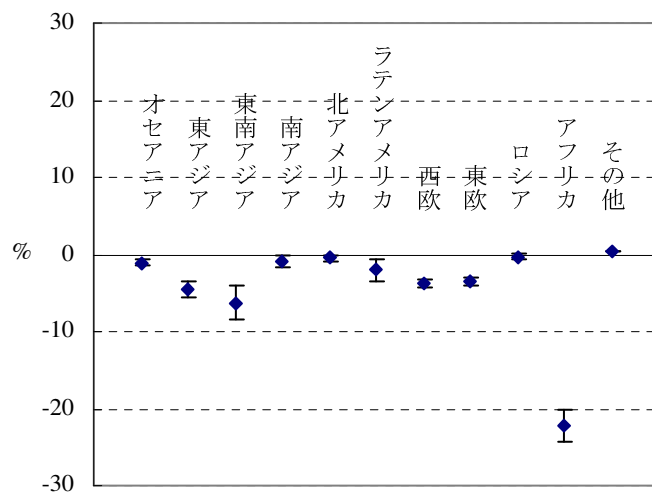


図 7.13 産出量の誤差

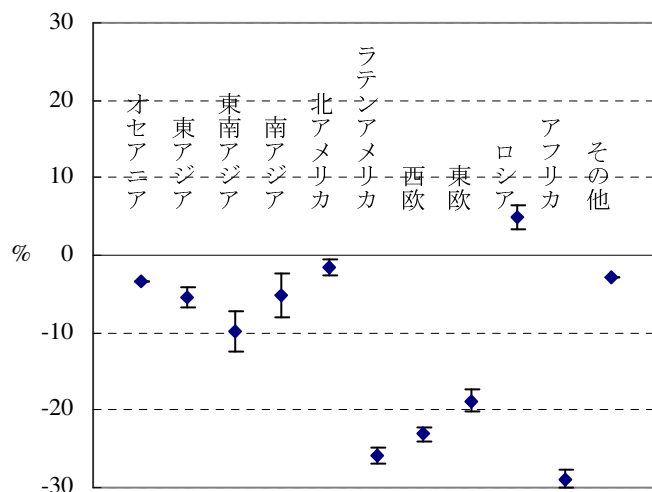


図 7.14 輸入量の誤差

#### 7.4.8 他研究と本研究の推計値の比較

本研究と他の窒素循環に関する比較を行う。本研究の推計値と他研究の推計値を比較した結果を表 7.46 に示す。他研究は、本研究ほど細かい産業活動、産物区分での計算を行っていないため、比較する値は集約化された値となる。また、対象年が異なることにも留意する必要がある。本研究と比べ本研究の推計値は、食料消費量でやや乖離が見られるものの全体として大きな差は見られなかった。

表 7.46 本研究と他研究の推計値の比較

フロー	値 (TgN/y)	文献	対象年	本研究推計値 (TgN/y)
燃料燃焼	24.5	Galloway(2004)	1990中頃	31.8
起源NOx	33.8	Olivier(2001)	1995	
肥料生産	86	Galloway(2004)	1990中頃	85.6
食料消費	23	Smil(1999)	1995	33.4

## 7.5 おわりに

炭素・窒素・リンの物質勘定表の構築を行った。この物質勘定表の作成のために、経済活動内、経済活動と環境とのやりとりのフローを扱う勘定体系を確立した。そして、物質フローと貨幣フローの情報を用いた、物質収支調整計算により財に関連するフローを推計した。また、廃棄物の処理、環境とのやりとりに関するフローを推計した。そして、本手法を2001年に適用した。その結果、世界全域での炭素・窒素・リンフローが明らかとなった。

## 参考文献

- [1] Bouwman, A. F., D. S. Lee, W. A. H. Asman, F. J. Dentener, K. W. Van Der Hoek, and J. G. J. Olivier (1997): A global high-resolution emission inventory for ammonia, *Global Biogeochemical Cycle*, **11**(4), 561-587.
- [2] Bouwman, A. F., Van Vuuren, D. P., Derwent, R. G. and Posch, M.(2002): A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems, *Water Air and Soil Pollution*, **141**(1-4), 349-382.
- [3] Byproducts and Unusual Feeds-Feedstuffs 1995 Reference Issue (ホームページ): [http://cnrit.tamu.edu/ganlab/Program/by\\_products\\_&\\_unusual\\_feeds.htm](http://cnrit.tamu.edu/ganlab/Program/by_products_&_unusual_feeds.htm).
- [4] Callander (1997): Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, IPCC.
- [5] FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations)(2005a): FAO Statistical Databases, Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, Italy.
- [6] 藤森真一郎(2004): 全世界のバイオマステーブルの構築, 京都大学卒業論文.
- [7] 藤野純一, 山本博巳, 山地憲治 (1997): バイオエネルギー資源評価のためのバイオマスバランス表の作成, *エネルギー・資源*, **18**(6), 578-581.
- [8] Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland, E. A., Karl, D. M., Michaels, A. F., Porter, J. H., Townsend, A. R. and Voosmarty, C. J.(2004): Nitrogen cycles: past, present, and future, *Biogeochemistry*, **70**(2), 153-226.
- [9] Galloway, J. N., Schlesinger, W. H., Levy, H., Michaels, A. and Schnoor, J. L.(1995): Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement- environmental response, *Global Biogeochemical Cycles*, **9**(2), 235-252,.
- [10] 後藤尚弘, 迫田章義 (2001): 地域ゼロエミッションをめざした産業ネットワーク設計支援ツールの開発, *環境科学会誌*, **14**(2), 199-210.

- [11]橋本征二, 森口祐一 (2004): 日本における伐採木材のマテリアルフロー・炭素フローデータブック, 国立環境研究所.
- [12]Hertel (2005): Global Trade, Assistance, and Production The GTAP 6 Data Base, Purdue University.
- [13]Houghton, J. T., L. G. Meria Filho, B. Lim, K. Treanton, I. Mamaty, Y. Bonduki, D. J. Griggs, and B. A. Callander (1997): Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, IPCC.
- [14]Howarth, R. W., Billen, G., Swaney, D., Townsend, A., Jaworski, N., Lajtha, K., Downing, J. A., Elmgren, R., Caraco, N., Jordan, T., Berendse, F., Freney, J., Kudeyarov, V., Murdoch, P. and Zhao-Liang, Z. (1996): Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic ocean: natural and human influences, *Biogeochemistry*, **35**(1), 75-139.
- [15]IFA/FAO/IFDC (1999): Fertilizer use by crop fourth edition.
- [16]IFA/FAO/IFDC (2002): Fertilizer use by crop fifth edition.
- [17]IPCC (2001): Climate change 2001: the scientific basis, Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- [18]Johansson, T. B., H. Kelly, A. K. N. Reddy, R. H. Williams, and L. Burnham (1993): RENEWABLE ENERGY Sources for Fuels and Electricity.
- [19]香川芳子 (2004): 五訂食品成分表, 第一出版編集部.
- [20]Koopmans, A., J. Koppejan (1997): Agricultural and forest residues: Generation, utilization and availability, paper presented at Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy, Food and Agric Org., Kuala Lumpur, 6–10 January.
- [21]三菱総合研究所 (2001): 循環型社会構築のための基礎的情報収集整理業務(循環型資源の発生量等に関する調査)報告書.
- [22]農林水産省総合食料局 (2000): 食料需給表.
- [23]農林水産省統計情報部 (2000): 農林水産統計速報.
- [24]日本エネルギー学会 (2002): バイオマスハンドブック.
- [25]Olivier, J. G. J., J. J. M. Berdowski, J. A. H. W. Peters, J. Bakker, A. J. H. Visschedijk en J.-P. J. Bloos (2001): Applications of EDGAR. Including a description of EDGAR 3.0: reference database with trend data for 1970-1995, RIVM report, no. 773301 001/ NOP report no. 410200 051.
- [26]Olivier, J. G. J., A. F. Bouwman, C. W. M. van der Maas, J. J. M. Berdowski, C. Veldt, J. P. J. Bloos, A. J. H. Visschedijk, P. Y. J. Zandveld and J. L. Haverlag (1996): Description of EDGAR Version 2.0: A set of global emission inventories of greenhouse gases and ozone-depletion substances for all anthropogenic and most natural sources on a per country basis and on 1°×1° grid, RIVM report, no. 771060 002/ TNO-MEP report nr. R96/119.
- [27]Ryan, P., K. Openshaw (1991): Assessment of Biomass Energy Resources, a Discussion on its Need and Methodology, INDUSTRY AND ENERGY DEPARTMENT WORKING PAPER ENERGY SERIES PAPER, **48**(4).
- [28]Singh, K., S. K. Garg, A. Kalla, and A. Bhatnagar (2003): Oilcakes as protein sources in supplementary diets for the growth of *Cirrhinus mrigala* (Ham.) fingerlings: laboratory and

- field studies, *Bioresource Technology*, **86**, 283-291.
- [29] Smil, V. (1999): Nitrogen in crop production: An account of global flows, *Global biogeochemical cycles*, **13**(2), 647-662.
- [30] 諏訪亮一 (2005): 人間活動に伴う炭素、窒素、リンのマテリアルフローに関する研究, 京都大学修士論文.
- [31] UN (United Nations) (2001): United Nations World Urbanization Prospects, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations, New York, USA.
- [32] UNEP (United Nations Environmental Programme) (2004): Global Environmental Outlook, Yearbook 2004, Nairobi, Kenya.
- [33] Van Drecht, G., Bouwman, A. F. Knoop, J. M. Meinardi, and C. Beusen (2001): Global Pollution of Surface Waters from Point and Nonpoint Sources of Nitrogen, *The Scientific World JOURNAL*, **1**(S2), 632-641.
- [34] 山地憲治, 山本博巳, 藤野純一 (2000): バイオエネルギー, ミオシン出版.
- [35] 山本博巳, 藤野純一, 山地憲治 (1999): パルプ用木材利用の実態調査による木材バイオマス・フローの見直し, *エネルギー・資源*, **20**(2), 68-73.
- [36] Yevich, R., and J. A. Logan (2003): An assessment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world, *Global Biogeochemical Cycles*, **17**(4).



## 付録

### (1) 物質収支調整計算で用いる文字式

#### ・ 未知変数

##### 物量フロー

$qj_{i,j,r}^{in}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入量

$qei_{n,j,r}$  : 地域  $r$ 、環境投入物  $n$  の部門  $j$  への投入量

$qwi_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入量

$qj_{i,j,r}^{out}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出量

$qwg_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における廃棄物  $k$  の産出量

$qeo_{l,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における環境排出物  $l$  の産出量

$qq_{p,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における蓄積物  $p$  の蓄積量

$q_{i,r}^{exp}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量

$q_{i,r}^{imp}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量

$q_{i,r}^{stc}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量

##### 物質密度

$d_{i,r}^{out}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産の物質密度

$d_{i,r}^{exp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出の物質密度

$d_{i,r}^{imp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入の物質密度

$d_{i,r}^{dom}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費の物質密度

$d_{i,j,r}^{in}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  の投入の物質密度

$d_{i,r,s}^{exp}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出の物質密度

$d_{i,r,s}^{imp}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸入の物質密度

##### 観測値との乖離や物質密度の乖離など表す変数

$\varepsilon_{i,r}^{out}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{i,r}^{exp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{i,r}^{imp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{i,r}^{dom}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{i,r}^{stc}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量の観測値と推計値の乖離

#### ・ 既知変数

##### 貨幣フロー

$\overline{v_{i,r}^{out}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産額

$\overline{v_{i,r}^{exp}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出額(fob 価格)

$\overline{v_{i,r}^{imp}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入額(cif 価格)

$\overline{v_{i,r}^{n\text{"dom"}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費額

$\overline{vj_{i,j,r}^{n\text{"in"}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  の投入額

$\overline{vt_{i,r,s}^{n\text{"exp"}}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出額

$\overline{vt_{i,r,s}^{n\text{"imp"}}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸入額

### 物量フロー観測値

$\overline{s_{i,r}^{n\text{"out"}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{n\text{"exp"}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{n\text{"imp"}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{n\text{"dom"}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{n\text{"stc"}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量の観測値

### 設定変数

$\overline{cwg i_{i,j,k,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

$\overline{cwg k_{k',k,j,r}}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k'$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

$\overline{cwgo_{k,j,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における統計から別途推計する廃棄物  $k$  の産出量

$\overline{ceoi_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

$\overline{ceoo_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

$\overline{ceos_{l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における統計から別途推計する排出物  $l$  の産出量

$\overline{cwg w_{j',k,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j'$  から産出された廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入割合(-)

$\overline{cq q_{i,p,j}}$  : 財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い蓄積される蓄積物  $p$  の割合(-)

$\overline{c\alpha_{i,r}^f}$  : 観測値と推計値の乖離  $\epsilon_{i,r}^f$  に関する許容限界(-)

$\overline{w\varepsilon_{i,r}^f}$ : 観測値と推計値の乖離  $\varepsilon_{i,r}^f$  に対する重み

$\overline{wj_{i,j,r}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内投入の部門間の物質密度の誤差の重み

(2) 物質収支調整計算で用いる集合

$r \in R$ : 地域の集合

$s \in S$ : 地域の集合

$i \in I$ : 財の集合

$j \in J$ : 部門の集合

$k \in K$ : 廃棄物の集合

$n \in N$ : 環境投入物の集合

$l \in L$ : 環境排出物の集合

$p \in P$ : 蓄積物の集合

$f \in F$ : 生産 "*out*"、輸出 "*exp*"、輸入 "*imp*"、地域内消費 "*dom*"、在庫増減 "*stc*" の集合

## 第8章 全世界の鉄物質勘定表の構築

現代社会において鉄は多くの産業、消費者にとって必要不可欠な物質である。しかし、産業の中でも鉄鋼産業は多量の  $\text{CO}_2$  を排出し、エネルギー多消費部門と位置づけられている。そのため、地球温暖化問題、それに対する対策を考える上で、今後の鉄の需給動向に関する情報は重要である。これに対して、鉄鋼の生産・消費・貿易に関する情報は国際鉄鋼協会(IISI)などで集計されているが、世界全域をカバーし、かつ自動車、機械、建設物などの製品中の鉄も含めた、鉄需給やフロー、ストックに関する情報は現存しない。そこで、本研究では今後の鉄の動向を見通すための基礎データとして、2001 年における世界の鉄フローを示す。そのために本研究では全世界鉄物質勘定表を開発・作成し、その勘定体系に従い世界の鉄フローを推計した。推計方法には藤森ら(2005)で示してきた物質収支調整計算を用いた。本研究の手法により、先進国内のフローだけでなく、統計情報が乏しい途上国フロー、貿易フローについても推計された。本論文ではその結果のうち、鉄の国際分業状態、各地域における長期的蓄積への追加量、鉄スクラップの貿易と国内供給の 3 点について示す。

### 8.1 はじめに

現代社会において鉄は多くの産業、消費者にとって必要不可欠な物質となっている。産業部門が必要とする鉄は 2 種類に分かれる。一つは、原料として使われる鉄鋼であり、もう一つは生産要素となる機械、建設物、輸送機器等の資本中の鉄である。また、家計や政府といった最終消費者においては、建設物、土木構造物、自動車などの形態で鉄を消費している。

その鉄需要を支えている鉄鋼業では多大なエネルギー、化石燃料が投入されている。例えば、Hidalgo *et al.*(2003)によると、2000 年における EU の全工業部門で使用する 272.7Mtoe のエネルギーのうち、約 19%にあたる 51.5Mtoe を鉄鋼業が消費している。また、二酸化炭素の排出量で見ると、世界全体で排出している二酸化炭素排出量の 7%が鉄鋼業由来の排出となっており (Kim and Worrell, 2002)、鉄鋼業は地球温暖化問題を考える上で重要な産業のひとつといえる。

これまで、世界全体で見ると鉄鋼の生産量は増加の一途をたどってきた。世界の粗鋼生産量についてみると、1950 年は 2 億トンであったのに対して、2001 年には 8 億 5000 万トンとなった。現在でも中国やインドなど途上国の急速な開発に伴って、鉄鋼需要が増大しており、今後も世界的に見ると鉄鋼の需要は増加する可能性が高い。一方、先進国に目を向けてみると鉄鋼の需要は頭うちとなっている。例えば、Crompton(2000)によると日本の粗鋼消費量は 1970 年代中盤から 1990 年終盤まで約 8000 万トン付近で横ばいとなっている。このことは 2 つの可能性を示唆するもので、一つは先進国における土木・建設といった大規模な鉄の資本の投入が落ち着き、資本の維持期に入っている可能性であり、もう一つは物質集約的な産業が途上国へ移転していつている可能性である。

しかし、途上国もさることながら先進国においても今後の鉄の動向は依然として明らかでない。その主たる理由として以下の 4 点が考えられる。第一に、各国でいつどのくらいの鉄需要、資本の更新があるかが明らかでないこと、第二に各国でどのくらいの鉄資本が

蓄積されているのかが不明であること、第三に更新される資本はリサイクル財によってまかなわれるのか、あるいは処女財を投入しなくてはならないのかが不明なことである。最後の四点目として、国際分業、それに付随した国際貿易などの見通しも明らかでないことである。これらの動向は、今後の資源、環境戦略に深く関わる重要な問題である。

上記のような不明点を明らかにするには、世界各国々の鉄の蓄積量、消費量、鉄鋼、その他工業製品の生産量の推移等、鉄のフローとストックについて詳細かつ包括的な知見が必要である。しかし、既存の研究で得られている知見は先進国など一部に限られたものである。例えば、醍醐ら(2005)、醍醐ら(2007)、Muller(2006)、村瀬(2004)、Dahlstrom *et al.*(2004)の研究は鉄のフローやストックを定量化したものの一国といった限定された地域が対象である。とりわけ今後の鉄需要の増加が見込まれる途上国、新興国等に関する情報、あるいは貿易に関する情報はほとんどないといつてよいのが現状である。また、物質の消費に関しては Malenbaum(1978)が示した Intensity of Use 曲線がよく知られており、これは実際に Crompton(2000) や van Vuuren *et al.*(1999) らによって将来の鉄鋼需要のモデリングに用いられている。しかし、これらの研究で明らかとなるのは、鉄鋼需要(見かけ消費量)のみであり、建築物、機械等の最終製品の消費量、貿易量、蓄積量は考慮されておらず、鉄の主要な需要源である長期的蓄積を明示的に捉えることができていない。

こうした背景を踏まえて、本研究では将来の鉄需給を見通すための情報作成の初期段階として、2001 年の全世界の各国内、各国間の鉄のフローを明らかにすることを目的とする。そのために、本研究では付録に示すような鉄フローを記述する勘定表を構築した。この勘定表は、投入、産出、貿易のフローをそれぞれ記述する 3 種類の表で構成され、各地域内の経済部門間、環境と経済部門間、多国間のフローを対象とする。部門、物質はそれぞれ投入産出の物質収支条件を満たし、整合的かつ包括的に人間活動由来のフローを記述する。類似の物質勘定表はこれまで Nakamura *et al.*(2005)、Hawkins *et al.*(2007) らなどによって作成が試みられてきている。これらの手法では単一国のフローしか扱えなかったが、本研究では、先進国だけでなく貿易間の不整合データの調整、途上国など情報が乏しい国のフローの推計を行った。

## 8.2 全世界を対象とした鉄物質勘定表

### 8.2.1 全世界鉄物質勘定表の概要

本研究では、全世界鉄勘定表(Global Iron and Steel Account Table)を開発した。全世界鉄勘定表は全世界における人間活動に伴う鉄のフローを記述する勘定表である。環境と経済部門間、地域内の経済部門間、多国間の経済部門間における鉄を含有する物質のフローを鉄重量単位で記述したものである。本章では勘定表の対象、産物や部門の分類について述べる。また、本研究で作成した勘定表の例を付録 A に示す。

### 8.2.2 対象

全世界鉄勘定表では、人間活動により発生するフローを勘定の対象とする。ここで人間活動とは、各経済部門における生産、消費、蓄積活動を指す。製鉄するために採掘する鉄鉱石を環境投入物とし、環境中から経済部門へのフローが生じるものとする。最終処分され埋め立てられる廃棄鉄含有物等を環境排出物とし、経済部門から環境中へのフローが生

じるものとし、人間活動によって生産、消費、廃棄される、鉄鉱石、鉄鋼製品、自動車、機械、建設物などの最終製品、鉄くずを中心とした鉄を含む物質を対象物質とした。本論文では、対象物を産物と呼び、投入、産出といった産物のやり取りをする主体を(経済)部門とよぶ。

### 8.2.3 勘定表の構成

本研究の物質勘定表は、主体別物質投入表(以降 U 表と呼ぶ)、主体別物質産出表(以降 V 表と呼ぶ)、地域間物質移動表(以降 T 表と呼ぶ)の 3 種類の表で構成される。U 表、V 表は地域内の投入産出構造を記述する表であり、行が産物、列が部門で構成され、地域ごとに作成した。産物が部門へ投入されるフローを U 表に記述し、部門から産物が産出されるフローを V 表に記述する。T 表は各地域間での貿易量を記述する表であり、行は輸出地域、列は輸入地域で構成され、貿易される産物ごとに作成した。本研究で作成した勘定表である主体間物質投入表、主体間物質産出表、地域間物質移動表の一部を付録 A に示す。

財、廃棄物、及び生産活動、最終需要(家計、政府)においては産物の投入量と産出量の物質収支が成り立つ。そのため、行の要素である財、廃棄物においては U 表と V 表の行計が同じ値をとる。同様に列の要素である生産活動、家計、政府においては U 表、V 表の列計が同じ値をとる。また、T 表で示される、ある地域におけるある財の世界全域への輸出量合計は、その地域における U 表の財の国外への投入量と一致し、同様に T 表の世界全域からの輸入量合計は、地域における V 表の財の国外からの産出量と一致する。

本研究の対象地域は世界全域であり、GTAP(Dimaranan, 2006) の 87 地域分類を基とし、類似地域を集約化して 41 地域に分類した。具体的な地域区分は表 8.1 に示す。

表 8.1 本研究地域区分

地域区分						
オーストラリア	インドネシア	カナダ	その他アメリカ	ドイツ	スペイン	CIS
ニュージーランド	マレーシア	アメリカ	オーストリア	イギリス	スウェーデン	トルコ
その他オセアニア	フィリピン	メキシコ	ベルギー	ギリシャ	その他EFTA	中東
中国	タイ	アルゼンチン	デンマーク	イタリア	チェコ	南アフリカ
日本	インド	ブラジル	フィンランド	オランダ	ポーランド	その他アフリカ
韓国	その他アジア	その他アンデス	フランス	ポルトガル	その他ヨーロッパ	

### 8.2.4 産物・部門の分類

本研究では8.2.2節で示した産物をフローとストックの 2 種類に分類した。ストックとは 1 年以上部門内で保持される産物を指し、フローはストック以外の産物を指す。産物の分類を表-1 に示す。この中で、環境投入物(鉄鉱石・砂鉄)と鉱物(鉄鉱石・砂鉄)は同一の物質であるが、前者は鉱山から採取してきたもの、後者は財として市場で取引されるものとして別の扱いとした。ここで、産物分類の一つである鉄鋼は粗鋼だけでなく鋼板や鉄鋼製品も含む。また、環境排出物の廃棄鉄くずと鉄スクラップも同一の物質であるが、前者は鉄スクラップの中でも処理場などの環境へ廃棄されるもののみを指し、後者は前者以外の全ての鉄スクラップをさす。環境排出物はストックの一部として扱った。部門分類については藤森ら(2006) に準ずる。

表 8.2 産物分類

フロー		
鉱物(鉄鉱石・砂鉄)	自動車	機械
鉄鋼	輸送機械	その他の製品
金属製品	電子機器	建設物
鉄スクラップ	環境投入物(鉄鉱石・砂鉄)	
ストック		
鉄製品蓄積	電子機器蓄積	建設物蓄積
自動車蓄積	機械蓄積	その他蓄積
輸送機器蓄積		
環境排出物(鉱さい、鉄鋼ダスト、廃棄鉄くず)		

### 8.3 推計方法

#### 8.3.1 使用する統計とその問題・推計の方針

前述の勘定体系を推計するのに、得られる情報は以下のとおりである。物量情報は、鉄鋼、鉄鉱石の生産量、輸出入量(UN, 2006a; IISI, 2005; UN, 2006b)である。それ以外に貨幣の情報として産業連関表、貿易マトリクスがある。産物フローのうち、物量情報が得られるものは少なく、大部分を貨幣フローから推計することとなる。また、統計情報には鉄鋼、鉄鉱石の輸出入量の世界全体の貿易総量の不一致があり、それらも調整される必要がある。次節ではこれらの問題を踏まえて推計の方法を示す。

#### 8.3.2 推計方法の概要

推計方法の概要を図 8.1 に示す。まず、各種統計データから鉄関連の産物量に関するデータを得て、財の生産や貿易量を鉄量換算する。次に、それらの鉄換算したデータと経済統計や各種文献などのデータを用いて、U 表、V 表、T 表の推計を物質収支調整計算を用いて行った。

物質収支調整計算とは、物質のフローを考慮し金銭の収支と物量の収支を調整する作業である。この作業の中心となる概念は「物質密度」であり、1 単位金額の財  $i$  に含まれる物質の重量と定義される。前章で示した産物、部門の各項目で物質収支を考慮し各情報に最も整合的な物質密度を求解する。その計算過程においては、各部門における産物の投入量合計と産出量合計が一致する、あるいは各産物の部門からの産出量合計と部門への投入量合計が一致するような制約条件を設ける。各種生産統計における報告値を、誤差を持つ観測値とみなし、この誤差の絶対値和を最小とする諸変数を求めた。

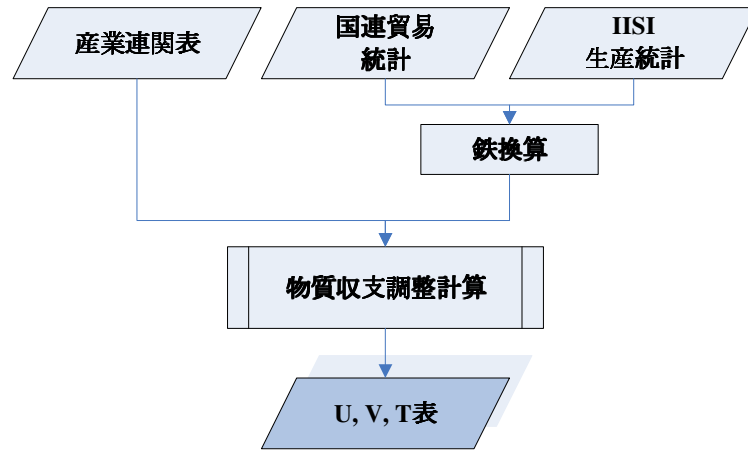


図 8.1 推計手法概要図

### 8.3.3 物質収支調整計算

物質収支調整計算は第7章で示したものであり、ここではその方法を簡単に示す。物質収支は財と部門について成り立つ(式(8.1)、式(8.2))。

$$q_{i,r}^{\text{"out"}} + q_{i,r}^{\text{"imp"}} + q_{i,r}^{\text{"stc"}} = q_{i,r}^{\text{"dom"}} + q_{i,r}^{\text{"exp"}} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (8.1)$$

$$\sum_{i \in I} q_{i,j,r}^{\text{"out"}} + \sum_{k \in K} qw_{k,j,r} + \sum_{l \in L} qeo_{l,j,r} + \sum_{p \in P} qq_{p,i,r} = \sum_{i \in I} q_{i,j,r}^{\text{"in"}} + \sum_{k \in K} qwi_{k,j,r} + \sum_{n \in N} qei_{n,j,r} \quad \forall j \in J, r \in R \quad (8.2)$$

ここで、

$q_{i,j,r}^{\text{"in"}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入量

$qei_{n,j,r}$  : 地域  $r$ 、環境投入物  $n$  の部門  $j$  への投入量

$qwi_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入量

$q_{i,j,r}^{\text{"out"}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出量

$qwg_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における廃棄物  $k$  の産出量

$qeo_{l,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における環境排出物  $l$  の産出量

$qq_{p,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における蓄積物  $p$  の蓄積量

$q_{i,r}^{\text{"exp"}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量

$q_{i,r}^{\text{"imp"}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量

$q_{i,r}^{\text{"stc"}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量

ここで、 $R$  は地域の集合を、 $I$  は財の集合を、 $J$  は部門の集合を表す。 $K$  は廃棄物の集合、 $N$  は環境投入物の集合、 $L$  は環境排出物の集合、 $P$  は蓄積物の集合を表す。

次に、物質密度を定義する。物質密度とは一単位当たりの物質質量であり、価格の逆数である。そこで、その物質密度、物質フローと貨幣フローの関係を示す。式(8.3)は部門  $j$  における財  $i$  の産出量に関する式で、金額フロー  $\overline{v_{i,r}^{\text{"out"}}}$  に物質密度  $d_{i,r}^{\text{"out"}}$  を乗じる。同様に金額フローに物質密度を乗じることで、式(8.4)は財  $i$  の輸入量、式(8.5)は財  $i$  の輸出量、式(8.6)は在庫増減、式(8.7)は財  $i$  の部門  $j$  への投入量を表す。ここで、 $Q(x)$  をある変数  $x$  が存在するという述語と定義する。



$$q_{i,r}^{out} = \overline{v_{i,r}^{out}} \cdot d_{i,r}^{out} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q \left( \overline{v_{i,r}^{out}} \right) \quad (8.3)$$

$$q_{i,r}^{exp} = \overline{v_{i,r}^{exp}} \cdot d_{i,r}^{exp} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q \left( \overline{v_{i,r}^{exp}} \right) \quad (8.4)$$

$$q_{i,r}^{imp} = \overline{v_{i,r}^{imp}} \cdot d_{i,r}^{imp} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q \left( \overline{v_{i,r}^{imp}} \right) \quad (8.5)$$

$$q_{i,r}^{dom} = \overline{v_{i,r}^{dom}} \cdot d_{i,r}^{dom} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q \left( \overline{v_{i,r}^{dom}} \right) \quad (8.6)$$

$$q_{i,j,r}^{in} = \overline{vj_{i,j,r}^{in}} \cdot dj_{i,j,r}^{in} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \wedge Q \left( \overline{vj_{i,j,r}^{in}} \right) \quad (8.7)$$

ここで、

貨幣の生産、輸出、輸入、国内消費をそれぞれ  $\overline{v_{i,r}^{out}}$ 、輸出を  $\overline{v_{i,r}^{exp}}$ 、輸入を  $\overline{v_{i,r}^{imp}}$ 、国内消費を  $\overline{v_{i,r}^{dom}}$ 、部門  $j$  への投入を  $\overline{vj_{i,j,r}^{in}}$  とする。それぞれの金額は、税金を含めた額であるとし、輸出は fob、輸入は cif 価格とする。

地域  $r$ 、財  $i$  の生産、輸出、輸入、国内消費の物質密度をそれぞれ  $d_{i,r}^{out}$ 、 $d_{i,r}^{exp}$ 、 $d_{i,r}^{imp}$ 、 $d_{i,r}^{dom}$ 、部門  $j$  における財  $i$  の投入の物質密度を  $dj_{i,j,r}^{in}$  とする。

また、地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出の物質密度を  $dt_{i,r,s}^{exp}$ 、輸入の物質密度を  $dt_{i,r,s}^{imp}$  とし、輸出額、輸入額をそれぞれ、 $\overline{vt_{i,r,s}^{exp}}$ 、 $\overline{vt_{i,r,s}^{imp}}$  とすると以下の式が成り立つ。

$$qt_{i,r,s} = \overline{vt_{i,r,s}^{exp}} \cdot dt_{i,r,s}^{exp} \quad \forall i \in I, s \in S, r \in R \wedge Q \left( \overline{vt_{i,r,s}^{exp}} \right) \quad (8.8)$$

$$qt_{i,r,s} = \overline{vt_{i,r,s}^{imp}} \cdot dt_{i,r,s}^{imp} \quad \forall i \in I, s \in S, r \in R \wedge Q \left( \overline{vt_{i,r,s}^{imp}} \right) \quad (8.9)$$

ここで、 $S$  は地域の集合を表し、 $R$  と等しい。

次に廃棄物について定式化する。式(8.10)は部門  $j$  における廃棄物  $k$  の産出量を表す式である。右辺は財  $i$  の投入に比例して産出する廃棄物  $k$  の産出量であり、財の投入量  $q_{i,j,r}^{in}$  に係数  $\overline{cwg_{i,j,k,r}}$  を乗じる。

$$qwg_{k,j,r} = \sum_i q_{i,j,r}^{in} \cdot \overline{cwg_{i,j,k,r}} \quad \forall k \in K, j \in J, r \in R \quad (8.10)$$

ここで、

$\overline{cwg_{i,j,k,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

次に、環境排出物について定式化する。式(8.11)は部門  $j$  における環境排出物  $l$  の産出量を表した式である。右辺は財  $i$  の投入に比例して産出する環境排出物  $l$  の産出量であり、財の投入量  $q_{i,j,r}^{in}$  に係数  $\overline{ceoi_{i,l,j,r}}$  を乗じる。

$$qeo_{l,j,r} = \sum_i qj_{i,j,r}^{in} \cdot \overline{ceoi_{i,l,j,r}} \quad \forall l \in L, j \in J, r \in R \quad (8.11)$$

ここで、

$\overline{ceoi_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

次に廃棄物の投入について定式化する。式(8.12)は廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入量を推計する式で、財の産出量  $q_{i,r}^{out}$  に係数  $\overline{cwgw_{j,k,r}}$  を乗じたものに誤差  $\varepsilon_{lk,j,r}$  を足す。

$$qwi_{k,j,r} = q_{j,r}^{out} \cdot \overline{cwgw_{j,k,r}} + \varepsilon_{lk,j,r} \quad \forall k \in K, j \in J_{I-S}, r \in R \quad (8.12)$$

ここで、

$\overline{cwgw_{j,k,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  から産出された財のうちの廃棄物  $k$  の投入割合(-)

$J_{I-S}$  は鉄鋼部門の集合を表す。廃棄物の投入は鉄鋼部門は行わないこととした。

次に蓄積物について定式化する。式(8.13)は部門  $j$  における蓄積物  $p$  の産出量を表す式で、財  $i$  の投入量  $qi_{i,j,r}^{in}$  に係数  $\overline{cqqi_{i,p,j}}$  を乗じる。

$$qq_{p,j,r} = \sum_i qi_{i,j,r}^{in} \cdot \overline{cqqi_{i,p,j}} \quad \forall p \in P, j \in J, r \in R \quad (8.13)$$

$\overline{cqqi_{i,p,j}}$  : 財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い蓄積される蓄積物  $p$  の割合(-)

物質フローの生産、輸出、輸入、国内消費、在庫増減、バイラテラルの貿易についてそれぞれ観測値  $\overline{s_{li,r}^{out}}$ 、 $\overline{s_{li,r}^{exp}}$ 、 $\overline{s_{li,r}^{imp}}$ 、 $\overline{s_{li,r}^{dom}}$ 、 $\overline{s_{li,r}^{stc}}$ 、 $\overline{s_{2i,r,s}^{exp}}$ 、 $\overline{s_{2i,r,s}^{imp}}$  が存在する場合がある。式

(8.14)から式(8.19)はそれぞれ財  $i$  の産出量、輸入量、輸出量、在庫増減量の報告値と推計値との関係を表す式である。

$$q_{i,r}^{out} = \overline{s_{li,r}^{out}} \cdot (1 + \varepsilon_{2i,r}^{out}) \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q \left( \overline{s_{li,r}^{out}} \right) \quad (8.14)$$

$$q_{i,r}^{exp} = \overline{s_{li,r}^{exp}} \cdot (1 + \varepsilon_{2i,r}^{exp}) \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q \left( \overline{s_{li,r}^{exp}} \right) \quad (8.15)$$

$$q_{i,r}^{imp} = \overline{s_{li,r}^{imp}} \cdot (1 + \varepsilon_{2i,r}^{imp}) \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q \left( \overline{s_{li,r}^{imp}} \right) \quad (8.16)$$

$$q_{i,r}^{stc} = \overline{s_{li,r}^{stc}} \cdot (1 + \varepsilon_{2i,r}^{stc}) \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q \left( \overline{s_{li,r}^{stc}} \right) \quad (8.17)$$

$$qt_{i,r,s} = \overline{s_{2i,r,s}^{imp}} \cdot (1 + \varepsilon_{3i,r,s}^{imp}) \quad \forall i \in I, r \in R, s \in S \wedge Q \left( \overline{s_{2i,r,s}^{imp}} \right) \quad (8.18)$$

$$qt_{i,r,s} = \overline{s_{2i,r,s}^{exp}} \cdot (1 + \varepsilon_{3i,r,s}^{exp}) \quad \forall i \in I, r \in R, s \in S \wedge Q \left( \overline{s_{2i,r,s}^{exp}} \right) \quad (8.19)$$

ここで、生産、輸出、輸入、国内消費、在庫増減の観測値と推計値の乖離を  $\varepsilon_{2i,r}^{out}$ 、 $\varepsilon_{2i,r}^{exp}$ 、

$\varepsilon_{2i,r}^{imp}$ 、 $\varepsilon_{2i,r}^{dom}$ 、 $\varepsilon_{2i,r}^{stc}$  とし、バイラテラル貿易の観測値と推計値の乖離を  $\varepsilon_{3i,r,s}^{exp}$ 、 $\varepsilon_{3i,r,s}^{imp}$  とする。

次に鉄スクラップの貿易を  $qts_{r,s}$  とする。鉄スクラップに関してもバイラテラルな貿易の報告値  $\overline{s_{3i,r,s}^{exp}}$ 、 $\overline{s_{3i,r,s}^{imp}}$  がある。

$$qts_{r,s} = \overline{s_{3i,r,s}^{imp}} \cdot (1 + \varepsilon_{4r,s}^{imp}) \quad \forall r \in R, s \in S \wedge Q \left( \overline{s_{3i,r,s}^{imp}} \right) \quad (8.20)$$

$$qts_{r,s} = \overline{s_{3i,r,s}^{exp}} \cdot (1 + \varepsilon_{4r,s}^{exp}) \quad \forall r \in R, s \in S \wedge Q \left( \overline{s_{3i,r,s}^{exp}} \right) \quad (8.21)$$

集合  $F$  を生産“out”、輸出“exp”、輸入“imp”、国内消費“dom”、在庫増減“stc”を表し、その要素を  $f$  とする。

最後に目的関数を設定する。式(8.22)は目的関数であり、左辺を最小化する。誤差量に重みを乗じたものと、地域  $r$ 、財  $i$  の国内投入の部門間の物質密度の誤差に重み  $wj_{i,j,r}$  を乗じたものを足して目的関数とした。

$$\begin{aligned} & \sum_k \sum_j \sum_r \left( \left| \varepsilon_{1j,k,r} \right| \cdot \overline{w\varepsilon_{1j,k,r}} \right) + \sum_f \sum_i \sum_r \left( \left| \varepsilon_{2i,r}^f \right| \cdot \overline{w\varepsilon_{2i,r}^f} \right) \\ & + \sum_i \sum_r \sum_s \left( \left| \varepsilon_{3i,r,s}^f \right| \cdot \overline{w\varepsilon_{3i,r,s}^f} \right) + \sum_r \sum_s \left( \left| \varepsilon_{4r,s}^f \right| \cdot \overline{w\varepsilon_{4r,s}^f} \right) + \sum_i \sum_j \sum_r \left( \left| d_{i,j,r}^{in} - d_{i,j,r}^{dom} \right| \cdot \overline{wj_{i,j,r}} \right) \rightarrow \min \end{aligned} \quad (8.22)$$

### 8.3.4 使用したデータと設定

#### (1) 統計データ

鉄鉱石、銑鉄、粗鋼の生産量、鉄スクラップの投入量については IISI(2005)、鉄鉱石、鉄スクラップの貿易量については COMTRADE(UN, 2006b) を用いた。また、金額単位の産業連関表、貿易マトリクスには GTAP (Dimaranan, 2006) を用いた。鉄鉱石の鉄含有率は 60%、銑鉄の鉄含有率は 95% とし、粗鋼の鉄含有率は 98% とした。これらの値のうち、鉄鉱石については、国連の工業統計の中で、鉄含有量のデータが存在する国について世界平均鉄含有量を算定し、それを用いた。鉄鉱石以外の鉄含有率については Dahlstroem(2004) の値である。貿易に関する物量データは、COMTRADE(国連貿易統計)を用いた。

#### (2) 設定係数

次に設定した係数について述べる(表 8.3)。係数設定は廃棄物、環境排出物の発生係数について行った。鉄鉱石から銑鉄を製造する過程において鉄鉱石の投入量の 4% が鉱さいとして環境排出物となとした。粗鋼から鉄鋼製品を製造する過程では、2% が鉄鋼ダストが環境へ排出されるとした。鉄鋼部門から発生する自家発生スクラップは、全量が自部門に投入されるとした。鉄鋼製品から各財の製造過程における加工時の鉄くずは投入量の 5% が発生するとした。また、鉄鋼の加工組立業(例えば金属製品、自動車製品等鉄を含有する

財の製造)に投入された場合、10%の加工鉄くずが発生すると仮定した。ただし、建設部門で発生する鉄くずは投入量の5%が発生するとした。固定資本形成を除く最終消費、鉄関連の財を生産しない生産活動における鉄の消費仮定では、5%がすぐに廃棄物として出て、残りは蓄積されると仮定した。これらの数値はDahlstroem(2004)のプロンプトスクラップ等の発生率を基にした。

表 8.3 廃棄物、環境排出物の発生係数

部門	産物	発生係数
鉄鋼	鋳さい	4%
鉄鋼	鉄鋼ダスト	2%
鉄鋼	鉄スクラップ	5%
加工・組立業	鉄スクラップ	10%
建設	鉄スクラップ	5%
その他の生産活動		
最終消費(固定資本形成を除く)	鉄スクラップ	5%

## 8.4 結果及び考察

本節では推計の結果を示す。まず本研究の推計値と統計値、他の研究の推計値を比較し、次に推計値の解析を行う。また、付録に世界全体のU表、V表及びT表を示す。

### 8.4.1 推計値と観測値の比較

本節では推計に用いた統計値と本研究の推計方法により調整された推計値の比較を行う。本研究の推計値は観測値が非常に乏しく、観測値は基本的に推計に用いるという方針を採っている。本節の比較では、調整計算によって異常な値を推計していないか、また調整された項目はどのような項目であったかを示す。比較には、以下に示す統計値と推計値の絶対誤差を用いた。

$$A_{f,r} = |E_{f,r} - S_{f,r}| \quad (8.23)$$

ここで、

$E_{f,r}$ : 地域  $r$  におけるフロー  $f$  の推計値

$S_{f,r}$ : 地域  $r$  におけるフロー  $f$  の統計値

$A_{f,r}$ : 地域  $r$  におけるフロー  $f$  の統計値と推計値の差

まず、表 8.4 に鉄鉱石、粗鋼の生産量、スクラップの投入量の絶対誤差について示す。ここで、粗鋼生産量は、鉄鉱石の投入量と鉄スクラップの投入量から歩留まり分を引いた値とした。表中には各地域の統計値と推計値の差の平均、分散、最大値、調整された地域数、統計値の平均、標準偏差、最大値を示す。ここで、調整された地域数とは、各フローにおいて統計値と推計値で差が見られたものである。表中の単位は調整された地域数を除き Tg/y である。

鉄鉱石、粗鋼、スクラップの統計値と推計値の差はそれぞれ平均が 0.05Tg/y、0.71 Tg/y、0.30 Tg/y、標準偏差が 0.15 Tg/y、2.97 Tg/y、1.89 Tg/y であった。平均は 1 Tg/y 以下であり統計値と推計値を比べるとそこまで大きな調整が行われなかったことがわかる。また、調整

された数も鉄鉱石、粗鋼でそれぞれ 6 地域、スクラップで 4 地域であり、対象地域が 41 地域であることを考えると少ない。その代わり最大値が 0.85 Tg/y、17.95 Tg/y、12.23 Tg/y となり、統計値の平均や最大値と比較すると大きくはないことがわかるが、限られた地域でやや大きな調整が行われていることがわかる。

表 8.4 生産量、投入量における統計値と推計値

		鉄鉱石 生産量	粗鋼 生産量	スクラップ 投入量
統計値と 推計値の差	平均	0.05	0.71	0.30
	標準偏差	0.15	2.97	1.89
	最大値	0.85	17.95	12.23
	調整された数	6	6	4
統計値	平均	22.95	21.19	6.76
	標準偏差	35.80	32.43	8.67
	最大値	126.00	147.00	41.98

次に、鉄鉱石とスクラップの貿易の統計値と推計値の比較を表 8.5 に示す。平均、標準偏差、最大値ともに大きな値を示していない。例えば、平均について見ると、鉄鉱石の輸出入で 1.29 Tg/y、1.25 Tg/y、スクラップは輸出入ともに 0.01 Tg/y 以下であった。表 8.5 の生産量や投入量と大きな違いが見られたのは、鉄鉱石の貿易で調整された地域数である。輸出入それぞれ 39 地域、32 地域となり、鉄鉱石の生産量での 6 地域と比べて多い。これは、計算過程において、多くの国では生産量や投入量の統計値が採用され、収支条件を満たすために貿易量で調整が行われているためである。

表 8.5 貿易量における統計値と推計値

		鉄鉱石		スクラップ	
		輸入量	輸出量	輸入量	輸出量
統計値と 推計値の差	平均	1.29	1.25	0.00	0.00
	標準偏差	1.99	2.99	0.01	0.01
	最大値	8.91	13.29	0.04	0.04
	調整された数	39	32	9	5
統計値	平均	7.67	7.67	1.67	1.67
	標準偏差	15.31	20.69	2.35	2.90
	最大値	75.00	94.60	11.76	14.60

#### 8.4.2 他研究と本研究推計値の比較

本節では他の研究の推計値と本研究の推計値を比較のうち日本鉄源協会(2006) との比較を行った。比較した項目は、日本における鉄鋼の生産量、輸出入量、間接輸出入量である。表 8.6 はそれぞれの項目について推計値と日本鉄源協会(2006) を示したものである。

鉄鋼の生産量・輸出入量については、両推計値間での差は小さい。これは、本研究と鉄源協会(2006) で同じデータ源を使っていることがその主たる要因であると考えられる。次に最終製品について見ると輸出量は同じような値を示しているが、輸入量にはやや差が見られる。ただし、この部分は観測値が存在せず、一概にどちらが正しいかを論じることは困難である。

表 8.6 本研究と日本鉄源協会の推計値の比較

財	フロー	本研究 推計値	鉄源協会 推計値
鉄鋼	生産量	100.1	97.2
	輸出量	29.0	32.7
	輸入量	3.9	3.8
最終製品	輸出量	18.6	19.5
	輸入量	8.0	3.7

### 8.4.3 世界全体の鉄フローの概観

図 8.2 に全世界における鉄のフローの概観を示す。

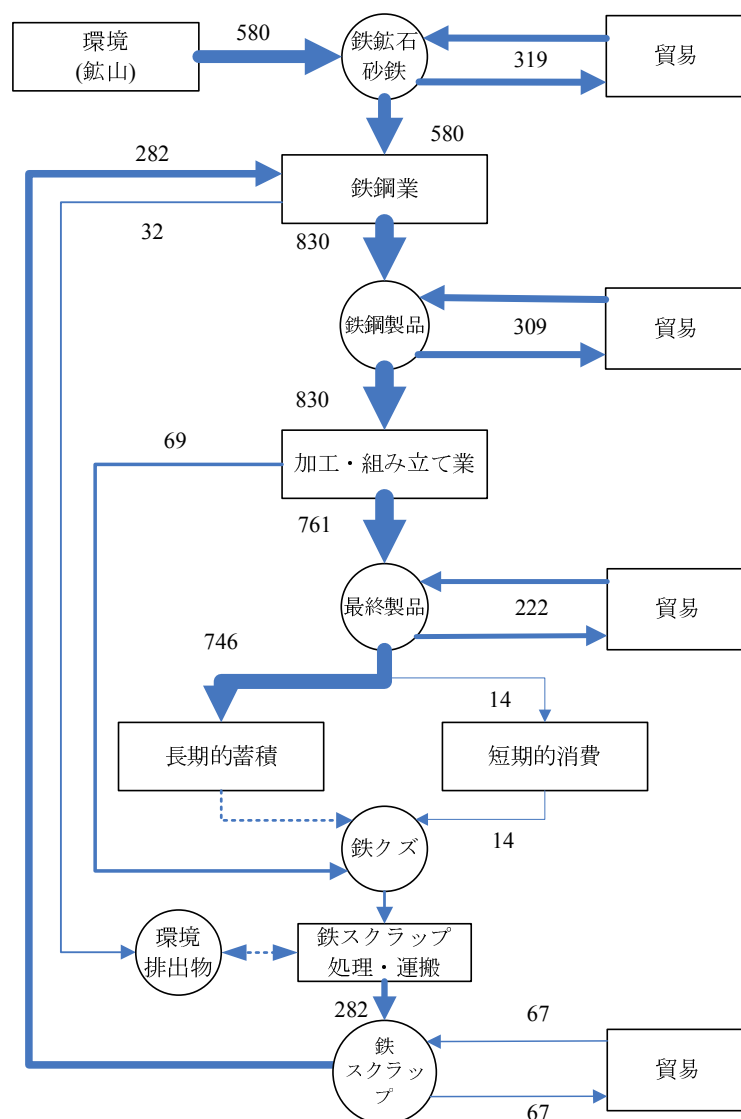


図 8.2 鉄のフロー概観図(Tg/年)

図中の数値の単位は Tg/y である。図中の矢印のうち点線で表されているものは本研究の推計で対象外のフローである。また、鉄鋼産業内で発生する自家発生スクラップはこの図には表されていない。

まず、鉱山から鉄鉱石、砂鉄が合わせて 580Tg/y 採取される。そのうち、半量以上の

319Tg/y が他地域に輸出される。鉄鋼部門ではその鉄鉱石とスクラップの再利用 282Tg/y を用いて 830Tg/y の鉄鋼製品を産出する。鉄鋼製品は 309Tg/y が貿易されている。鉄鋼製品はさらに加工されて、761Tg/y が自動車、機械、建設物等の財(以降、最終製品と呼ぶ)となる。最終製品は 222Tg/y が貿易される。またその他の財のうち、746Tg/y は長期的蓄積への追加となる。一方、スクラップは 67Tg/y が貿易されており、鉄鉱石や鉄鋼製品の貿易と比べるとそのフローは小さい。

#### 8.4.4 国際分業

##### (1) 貿易から見る国の類型

鉄鋼製品と最終製品の純輸出入に関する情報から、世界における国際分業状態を示す。国際分業状態は各地域、各財の純貿易の有無によって判別した。純輸出入の有無は、各地域内の需要量と比較し、需要量に対して貿易量が相当量あれば、純貿易があるとした。これは、フロー量が小さな地域も大きな地域と同様に扱えるようにするためである。比較する財として、鉄鋼製品と最終製品の 2 種類を用いた。以下にその具体的な計算方法と純輸出入の判別方法を示す。

$$SNT_r = \begin{cases} (SP_r - SI_r)/SI_r > 0.1 \rightarrow \text{鉄鋼製品純輸出口型} \\ |SP_r - SI_r|/SI_r < 0.1 \rightarrow \text{鉄鋼製品自立型} \\ (SP_r - SI_r)/SI_r < -0.1 \rightarrow \text{鉄鋼製品純輸入型} \end{cases} \quad (8.24)$$

$SNT_r$ : 地域  $r$  における鉄鋼の純貿易を判定する係数

$SP_r$ : 地域  $r$  における鉄鋼の生産量

$SI_r$ : 地域  $r$  における鉄鋼の製造業への投入量

$$CNT_r = \begin{cases} (CP_r - CI_r)/CI_r > 0.1 \rightarrow \text{最終製品純輸出口型} \\ |CP_r - CI_r|/CI_r < 0.1 \rightarrow \text{最終製品自立型} \\ (CP_r - CI_r)/CI_r < -0.1 \rightarrow \text{最終製品純輸入型} \end{cases} \quad (8.25)$$

$CNT_r$ : 地域  $r$  における最終製品の純貿易を判定する係数

$CP_r$ : 地域  $r$  における最終製品の純生産量

$CI_r$ : 地域  $r$  における最終製品の長期的蓄積、短期的消費への投入量

鉄鋼製品、最終製品それぞれで投入量と産出量を比較し、差が 10%を越える地域については純輸出入が相当量あるとする。上記の判別方法で判別した各地域別の純輸出入の有無を図 8.3 にまとめた。例えば、日本は鉄鋼製品、最終製品ともに純輸出しているため、一番右下のセルに記入される。ここでは経済状況、地理的分布等を総合的に評価し、各地域を 6 つの型に分類し、それぞれの特徴を以下で示す。

##### ① 類型 I (途上国・消費地域)

途上国の中でもまだ産業が発達していない国、例えば東南アジアやアフリカなどは鉄鋼製品、最終製品ともに輸入する傾向にある。図中では左上方に位置し、これらの地域は

主として消費地域となっている。

## ② 類型Ⅱ (途上国・供給地域)

ある程度産業が発展してきて、工業生産が盛んになると鉄鋼製品は自国内で調達できるようになり、鉄鋼製品の輸入がなくなる。図中では右の中段右側付近に位置する。トルコ、メキシコ、インドでは鉄鋼製品、最終製品ともに純貿易がない状態となり、中国、韓国では最終製品を輸出している。これらの地域は自国だけでなく、他国へも最終製品の供給地域となっている。

## ③ 類型Ⅲ (中堅欧州諸国・消費地域)

ヨーロッパ地域の中でも東欧や地中海沿岸を中心とした国、たとえばイタリア、スペインなどは、一人当たり GDP が比較的高いものの素材産業がそこまで充実しておらず、鉄鋼製品を輸入する傾向にある。最終製品は純輸入、もしくは純輸出入がない状態である。

## ④ 類型Ⅳ (資源国・供給地域)

鉄鉱石を産出する資源国は鉄鋼製品の生産し、輸出している。図中では下段真ん中から左側に位置し、代表的な国としてはオーストラリア、CIS、ブラジルなどである。国によっては最終製品を輸入するところも見られる。

## ⑤ 類型Ⅴ (先進国・供給地域)

さらに工業が充実した国では、鉄鋼製品も最終製品も輸出できるようになる。日本やドイツはその典型的な国であり、図中では右下方に位置する。これらの国々は供給地域となっている。

## ⑥ 類型Ⅵ (先進国・消費地域)

さらに産業が成熟化してくると最終的には鉄鋼製品、最終製品ともに純輸出入がなくなり、さらには純輸入に転じる国が表れる。図中では真ん中から左上方に位置し、北米、西欧諸国がこれらの国に該当する。アメリカ、カナダでは鉄鋼製品を輸入し、イギリスでは鉄鋼製品に加え最終製品も輸入している。

		類型Ⅰ (途上国・消費地域)			類型Ⅲ (中堅欧州諸国・消費地域)			類型Ⅱ (途上国・供給地域)		
		純輸入型			最終製品 自立型			純輸出力		
鉄鋼製品	純輸入型	中東 その他アメリカ その他アジア その他アフリカ		ギリシャ ポルトガル フィリピン マレーシア その他EFTA イギリス	スペイン インドネシア アメリカ フランス	イタリア タイ カナダ オーストリア オランダ	その他欧州 ポーランド デンマーク トルコ メキシコ インド			
	自立型							中国 韓国		
	純輸出力	ベルギー その他 オセアニア	オーストラリア アルゼンチン	旧ソ連	ブラジル	南アフリカ	ニュージーランド	チェコ 日本	フィンランド スウェーデン	ドイツ
		類型Ⅳ (資源国・供給地域)			類型Ⅵ (先進国・消費地域)			類型Ⅴ (先進国・供給地域)		

図 8.3 貿易構造による地域分類

## (2) 鉄スクラップの貿易と国内供給

スクラップの純輸出入量が大きかった上位 10 地域とその量、またそれらの地域における国内供給量あたりの純貿易量の割合を表 8.7、表 8.8 に示す。



表 8.7 スクラップ純輸出量と国内供給量に対する割合

	純輸出量(Tg/年)	国内供給量あたりの 純輸出量割合(%)
CIS	12.3	41
日本	5.7	23
ドイツ	4.9	32
アメリカ	4.8	11
イギリス	4.5	126
オランダ	1.7	216
フランス	1.5	23
ポーランド	1.1	34
オーストラリア	1.0	79
カナダ	0.8	12

表 8.8 スクラップ純輸入量と国内供給量に対する割合

	純輸入量(Tg/年)	国内供給量あたりの 純輸入量割合(%)
中国	10.2	40
韓国	6.3	39
トルコ	6.0	66
スペイン	5.5	49
イタリア	3.7	27
インド	2.4	41
マレーシア	1.5	42
ベルギー	1.2	40
インドネシア	1.0	41
その他欧州	0.9	17

スクラップの輸出は CIS と日本、欧州、北米などの地域で大きな値を示した。前項の国類型ではⅣ、Ⅴ、Ⅵの地域が中心となっている。特に CIS の輸出量は突出して大きく 12.3Tg/y であった。国内供給量あたりの純輸出量の割合を見るとイギリス、オランダで 100%を超えていて、これらの国では、国内供給量以上の鉄スクラップを輸出している。純輸出量が大きかった CIS、日本、ドイツ、アメリカはそれぞれ 41%、23%、32%、11%であった。

輸入についてみると、中国、韓国、トルコなど経済発展の著しい国々(類型Ⅱ)、欧州の中でもイタリア、スペインなどの類型Ⅲに属する国、類型Ⅰの途上国などが上位を占めている。上位3地域となった中国、韓国、トルコでそれぞれ 10.2Tg/y、6.3Tg/y、6.0Tg/y であった。表中で示されている地域の国内供給量あたりの純輸入量の割合は 40%付近が多数を占めている。

8.4.1 で示したように、貿易統計は生産量情報と比較すると調整されている項目、数値が大きい。そのため、本節の結果も生産量と比べると不確実性は大きいと考えられることに留意する必要がある。

#### 8.4.5 長期的蓄積への追加量

##### (1) 長期的蓄積への追加量総量

本節では各国別の長期的蓄積への追加量について示す。ここで言う長期的蓄積への追加には、長期的蓄積から排出される鉄スクラップのやりとりは考慮されていない。図 8.4 は長期的蓄積への追加量が大きかった上位 10 地域の長期的蓄積への追加量を示している。

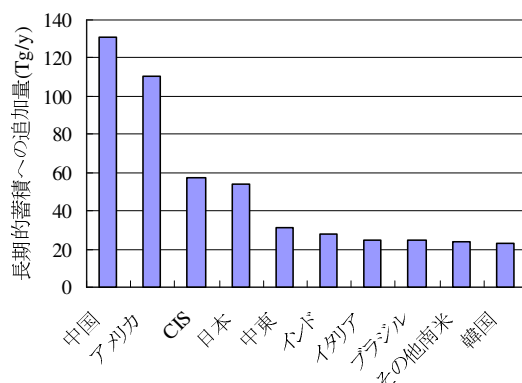


図 8.4 長期的蓄積への追加量上位 10 地域

中国、アメリカ、CIS、日本、中東といった地域が大きな値を示した。世界全体の長期的蓄積への追加量に占める割合はそれぞれ 18%、13%、7.9%、7.6%、4.6%となり、これらの 5 地域で世界全体の約半量を占めていた。主要先進国であるドイツ、イギリスなどのヨーロッパ圏の国が上位に入ってきておらず、中国、CIS、インドなど今後成長の見込まれる国々、いわゆる BRICs が上位に来ていることがわかる。また、アメリカ、日本といった先進国も依然として上位に位置する。

## (2) 長期的蓄積への追加量と GDP、人口の関係

前項では長期的蓄積への追加量の絶対量を比較したが、本項では GDP、人口、資本ストックというマクロ指標を用いて長期的蓄積への追加量を比較したときに各地域別でどのような傾向が見られるか分析する。既往の研究 (Malenbaum, 1978 など) で述べられてきた Intensity of Use 曲線は、GDP あたりの物質消費量を縦軸に、一人当たり GDP を横軸にとったときに逆 U 字型の曲線を描くというものであった。鉄のフローに関しては消費量として鉄鋼の見かけ消費量を適用した事例がある (Berdardini, 1993)。これが、長期的蓄積への追加量においても当てはまるのか、当てはまらないとするならばどのような傾向が見られるか検討する。

### 1) GDP あたりの長期的蓄積への追加量

GDP あたりの長期的蓄積への追加量を縦軸に、一人当たり GDP を横軸にとり、地域別にプロットしたものを図 8.5 に示す。

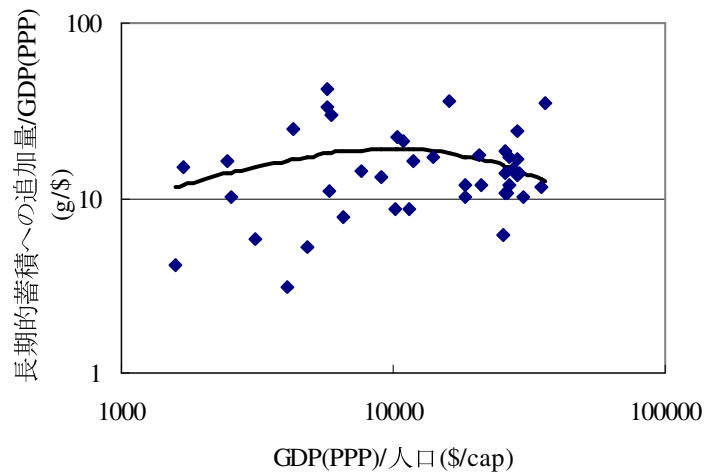


図 8.5 GDP あたりの長期的蓄積への追加量と、一人あたり GDP の関係

プロットは非常にまばらであることがわかる。*van Vuuren et al. (1999)* で用いられている需要曲線関数(式(8.26))を最小二乗法で当てはめたものが図中の曲線であるが、決定係数が 0.04 となり、Intensity of Use 曲線との適合度は悪い。

$$ST^{GDP} = \frac{a}{\frac{GDP}{POP} + b \cdot \left(\frac{GDP}{POP}\right)^c} \quad \begin{array}{l} a = 602.194 \\ b = 63.588 \\ c = -0.457 \end{array} \quad (8.26)$$

$ST^{GDP}$ : GDP あたりの長期的蓄積への追加量

この Intensity of Use 曲線が当てはまらなかった理由は 2 点考えられる。第一に、Intensity of Use 曲線は、各国別での時系列変化を見たときに観測されたものであり、地域別の単年のデータをプロットしても Intensity of Use 曲線の傾向は見えない可能性があることである。*Bernardini (1993)* は国や経済成長を遂げた年によってカーブのピークやカーブの勾配が異なる可能性があることを示している。第二に、Intensity of Use 曲線を議論するときには複数の物質をまとめた指標などを用いているケースがあるが、今回のような鉄という個別の物質に限ってみた場合には Intensity of Use 曲線が当てはまらない可能性があることである (*de Bruyn and Opschoor, 1997*)。

## 2) 一人あたりの長期的蓄積への追加量

次に、一人あたりの長期的蓄積への追加量をプロットしたものを図 8.6 に示す。図中の直線は、式(8.27)で示す累乗関数を最小二乗法で当てはめたものである。

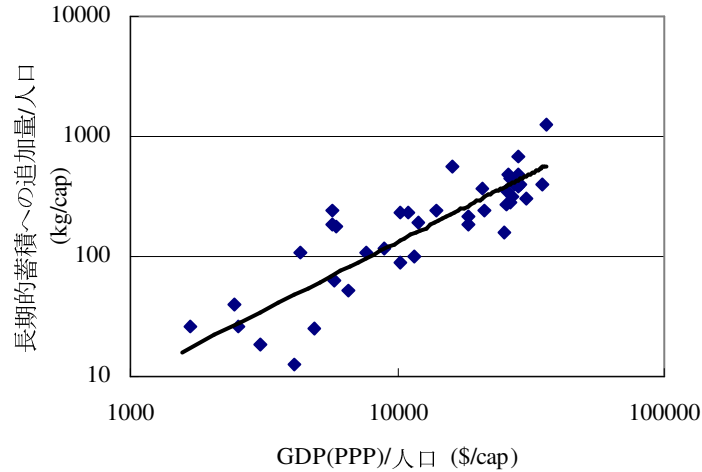


図 8.6 一人あたりの長期的蓄積への追加量と、一人あたり GDP の関係

$$ST^{POP} = a \cdot \left( \frac{GDP}{POP} \right)^b \quad a = 0.0076, \quad b = 1.062 \quad (8.27)$$

$ST^{POP}$ : 一人あたりの長期的蓄積への追加量

決定係数は 0.762 となり、一人あたりの長期的蓄積への追加量と一人あたりの GDP の間にはある一定の関係を見ることができる。式(8.27)は単調増加関数であり、一人当たりの長期的蓄積への追加量で見ると一人あたり GDP の増加とともに増大する傾向である。式(8.27)を用いると、長期的蓄積への追加量総量は式(8.28)となる。

$$\begin{aligned} ST^{TOTAL} &= ST^{POP} \cdot POP \\ &= a \cdot \left( \frac{GDP}{POP} \right)^b \cdot POP \\ &= a \cdot GDP^b \cdot POP^{1-b} \end{aligned} \quad (8.28)$$

$ST^{TOTAL}$ : 長期的蓄積への追加量

式(8.28)中の  $b$  は 1 に非常に近いため、蓄積量は人口よりも GDP に直接依存する関数となっている。IPCC の SRES(Nakicenovic and Swart, 2000) によると、いずれのシナリオにおいても今後世界全体で GDP が大きく増加することが見込まれており、本研究の結果は鉄需要が今後経済成長、人口増加に伴って大きく増大する可能性を示唆している。

### 3) 資本ストックと長期的蓄積への追加量の関係

前項までで示した散布図は横軸に一人当たりの GDP をとったが、本項では横軸に資本ストックをとったものについて考察する。資本ストックは GTAP(Dimaranan, 2006) に収録されているデータを用いた。図 8.7 は、各地域について一人当たりの長期的蓄積への追加量をプロットしたものであり、縦軸に一人当たりの長期的蓄積への追加量を取り、横軸に一人当たりの資本ストックをとった。前項と同様に累乗関数との適合度がよく、決定係数は 0.717 であった。また、係数  $a$ ,  $b$  はそれぞれ 0.224、0.677 であった。一人当たりの資本ストックを多く抱える地域ほど長期的蓄積への追加量も大きくなるという傾向が見て取れる。

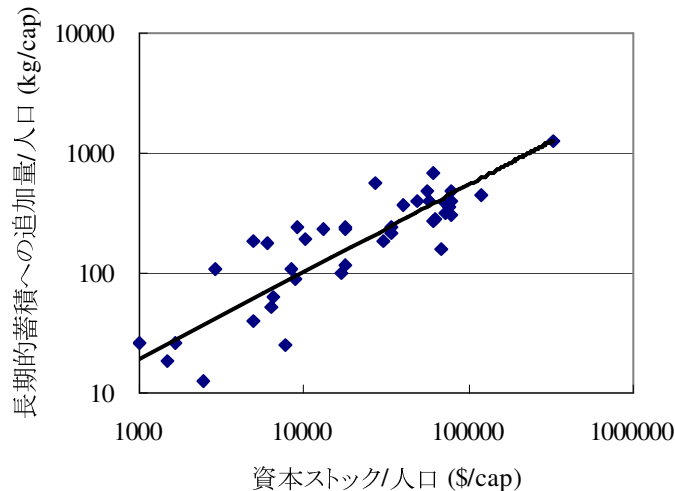


図 8.7 一人あたりの長期的蓄積への追加量と、一人あたりの資本ストック量の関係

## 8.5 おわりに

本研究では、物質収支調整計算を用いて、2001 年における人間活動による世界全体での鉄のフローを明らかにした。その結果、以下の 3 点が明らかとなった。

第一に、各地域における鉄鋼製品の純輸出入、最終製品の純輸出入の関係から、世界の各地域の国際分業状態を見ることができた。例えば、途上国のうち、比較的産業の発展が進んでいない、アフリカ、南米、アジア諸国では、鉄鋼製品、最終製品とも輸入し、消費地域となっているが、韓国、中国など産業が発展してきている国では最終製品を輸出する供給地域となっている。一方で、先進国の中でも日本やドイツは鉄鋼製品、最終製品ともに純輸出しており供給地域であったが、アメリカやイギリスは鉄鋼製品や最終製品の純輸入国となり、消費地域となっていた。

第二に、長期的蓄積への追加量を各地域についてみると、GDP あたりの長期的蓄積への追加量と一人当たり GDP の間に相関関係を見出すことはできないが、一人当たりの長期的蓄積への追加量と一人当たり GDP の間には一定の関係が見られた。具体的には一人当たりの長期的蓄積への追加量は一人当たり GDP の累乗関数  $a(GDP/POP)^b$  が最も適合した。また、資本ストック量と長期的蓄積への追加量にも同じような関係が見出された。

第三に、鉄スクラップの貿易について見ると、主に先進国、CIS 地域は純輸出国となり、アジア地域を中心とする途上国は純輸入国となっていることが示された。純輸出量が大きかったのは CIS、日本、ドイツでそれぞれ 12.3Tg/y、5.7Tg/y、4.9Tg/y であった。また、鉄スクラップの国内供給量の 41%、23%、32%を輸出している。純輸入量が大きかったのは、中国、韓国、トルコそれぞれ 10.2Tg/y、6.3Tg/y、6.0Tg/y であった。国内供給量あたりの純輸入量の割合は純輸入量上位国では 40%付近となっていた。

ただし、本研究の分析は以下の 3 点において不十分である。第一に、対象年が単年であることである。単年の分析では、各国で時系列的な推移が明らかとならず、本研究で示した GDP などの指標と投入量等の関係が一概に言えるかどうか確かでない。第二に、鉄の蓄積量が明らかになっていないことである。蓄積量や長期的蓄積からの排出量が明らかでないため、蓄積量と長期的蓄積への投入量の関係が分析できていない。第三に、昨今増加して

いる中古製品の輸出入をフローとして扱えていないことである。

これらの点を踏まえ、過去長期にわたるデータ作成と分析を行うことが今後の課題と考えられる。

## 参考文献

- [1] Bernardini, O. and R. Galli(1993): Dematerialization: Long-term trends in the intensity of use of materials and energy, *Futures*, May, 431-448.
- [2] Crompton, P.(2000): Future trends in Japanese steel consumption, *Resource Policy*, 26, 103-114.
- [3] 醍醐市朗, 藤巻大輔, 松野泰也, 足立芳寛(2005): 鋼材循環利用における環境負荷誘発量解析のための動態モデルの構築, *鉄と鋼*, **91**(1), 171-178.
- [4] 醍醐市朗, 五十嵐佑馬, 松野泰也, 足立芳寛(2007): 日本における鉄鋼材の物質ストック量の導出, *鉄と鋼*, **93**(1), 66-70.
- [5] Dahlstrom, K., P. Ekins, J. He, J. Davis, and R. Clift(2004): Iron, steel and aluminium in the UK: Material flows and their economic dimensions, Policy Studies Institute, London.
- [6] de Bruyn, S. M. and J. B. Opschoor(1997): Developments in the throughput-income relationship: Theoretical and empirical observations, *Ecological Economics*, **2**, 255-268.
- [7] Dimaranan, V. D.(2006): Global Trade, Assistance, and Production The GTAP 6 Data Base, Purdue University, , Center for Global Trade Analysis, Purdue University.
- [8] 藤森真一郎, 河瀬玲奈, 松岡 譲(2006): 全世界における人間活動に伴う窒素フローの推計に関する研究, *環境システム研究論文集*, **34**, 209-220.
- [9] 藤森真一郎, 諏訪亮一, 河瀬玲奈, 松岡 譲(2005): 全世界の人間活動に伴う炭素フローの推計手法の開発に関する研究, *環境システム研究論文集*, **33**, 149-158.
- [10] Gehlhar, M. J.(1996): Reconciling Bilateral Trade Data for Use in GTAP, , GTAP Technical Paper No.10, Center for Global Trade Analysis, Purdue University.
- [11] Hawkins T., C. Hendrickson, C. Higgins, H.S. Matthews, S. Suh(2007): A Mixed-Unit Input-Output Model for Environmental Life Cycle Assessment and Material Flow Analysis, *Environmental Science & Technology*, **41**(3), 1024-1031.
- [12] Hidalgo, I., L. Szabo, I. Calleja, J. C. Ciscar, P. Russ and A. Soria(2003): Energy consumption and CO2 emissions from the world iron and steel industry., European Commission Joint Research Center, Technical report series.
- [13] IISI(International Iron and Steel Institute)(2005): Steel Statistical Yearbook.
- [14] Kim, Y. and E.Worrell(2002): International comparison of CO2 emissions trends in the iron and steel industry, *Energy Policy*, **30**, 827-838.
- [15] Malenbaum, W.(1978): World demand for raw materials in 1985 and 2000, McGraw-Hill, New York.
- [16] van Vuuren, D. P., B.J. Strengers, and H.J.M. de Vries(1999): Long-term perspectives on world metal use- a model-based approach, RIVM report , 461502 021.
- [17] Muller, D.B., T.Wang, B.Duval, T.E.Graedel(2006): Exploring the engine of anthropogenic

- iron cycles, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**, 16111-16116.
- [18]村瀬透, 松岡 譲, 藤原健史(2004): 日本における人間活動に伴う物質の蓄積とそこからの廃棄物発生に関する研究, *環境システム研究論文発表会講演集*, **32**, 491-496.
- [19]Nakamura S, Nakajima K(2005): Waste Input-Output Material Flow Analysis of Metals in the Japanese Economy, *Materials transactions*, **46**(12), 2550-2553.
- [20]Nakicenovic N. and Swart, R.J.(2000): Emissions Scenarios 2000 . Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- [21]日本鉄源協会(2003): クォータリーてつげん, **15**.
- [22]UN(United Nations) (2006a): Industrial Commodity Production Statistics Database, United Nations, New York, USA.
- [23]UN(United Nations) (2006b): United Nations Commodity Trade Statistics Database, United Nations, New York, USA.

# 付録 A

附図 8.1 世界全体の U 表(Tg/y)

部門 産物	生産活動									最終需要			国外	行計
	鉱物	鉄鋼	金属	自動車	輸送	電子	機械	その他 製造	建設	その他	家計	政府	資本	
鉱物	580												319	899
鉄鋼製品	436	244	87	34	30	220	22	183		1	0	9	311	1,577
金属製品		24	17	6	9	29	5	64	55	18	1	24	34	286
自動車			31	0					18	41	1	46	43	180
輸送機器			3	8					15	7	2	17	15	66
電子機器			2	1	14	3	0	2	9	9	1	16	23	80
機械			8	6	8	40	1	20	47	24	6	114	99	374
その他製品			0	0	1	1	2	2	6	11	1	4	7	36
建設物								6		2	6	230		245
鉄スクラップ		282											67	349
環境投入物	580													580
環境排出物														0
その他蓄積物														0
列計	580	1,298	268	148	55	61	293	30	277	151	114	17	460	4,672

附図 8.2 世界全体の V 表(Tg/y)

部門 産物	生産活動									最終需要			国外	行計
	鉱物	鉄鋼	金属	自動車	輸送	電子	機械	その他 製造	建設	その他	家計	政府	資本	
鉱物	580												319	899
鉄鋼製品		1,266											311	1,577
金属製品			252										34	286
自動車				138									43	180
輸送機器					52								15	66
電子機器						57							23	80
機械							275						99	374
その他製品								28					7	36
建設物									245					245
鉄スクラップ			16	10	4	5	18	2	14	8	6	1	67	150
環境投入物														0
環境排出物		32												32
その他蓄積物									18	143	108	16	460	746
列計	580	1,298	268	148	55	61	293	30	277	151	114	17	460	4,672

附図 8.3 全産物合計の T 表(Tg/y)

輸出地域	輸入地域												輸出量計
	大洋州	日本	東アジア	その他 アジア	北米	中南米	西欧州	東欧州	CIS	中東	アフリカ		
大洋州	10	37	47	2	2		10						111
日本	3		18	10	7	6	7		1	3	2		56
東アジア	2	9	20	8	15	3	12	2	1	3	2		77
その他アジア	1	12	16	7	3		6	1		2			49
北米	1	4	10	3	36	4	15	4					75
中南米	2	22	20	4	15	20	37	4	3	4	3		135
西欧州	2	2	7	6	21	5	132	21	8	5	5		213
東欧州					2		21	8	2	2	1		36
CIS			20	3	4		21	20	28	9	5		111
中東			6	2			2			4			14
アフリカ		3	7	2	2		14				2		30
輸入量計	21	90	171	47	107	38	277	59	43	32	20		906



## 付録 B

### (1) 物質収支調整計算で用いられる文字式一覧

#### ・ 未知変数

##### 物量フロー

- $qj_{i,j,r}^{in}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入量  
 $qei_{n,j,r}$  : 地域  $r$ 、環境投入物  $n$  の部門  $j$  への投入量  
 $qwi_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入量  
 $qj_{i,j,r}^{out}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出量  
 $qwg_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における廃棄物  $k$  の産出量  
 $qeo_{l,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における環境排出物  $l$  の産出量  
 $qq_{p,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における蓄積物  $p$  の蓄積量  
 $q_{i,r}^{exp}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量  
 $q_{i,r}^{imp}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量  
 $q_{i,r}^{stc}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量  
 $qts_{i,r,s}$  : 鉄スクラップの地域  $r$  から地域  $s$  への貿易

##### 物質密度

- $d_{i,r}^{out}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産の物質密度  
 $d_{i,r}^{exp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出の物質密度  
 $d_{i,r}^{imp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入の物質密度  
 $d_{i,r}^{dom}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費の物質密度  
 $d_{i,j,r}^{in}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  の投入の物質密度  
 $dt_{i,r,s}^{exp}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出の物質密度  
 $dt_{i,r,s}^{imp}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸入の物質密度

##### 観測値との乖離や物質密度の乖離など表す変数

- $\varepsilon_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  の廃棄物  $k$  の投入量誤差  
 $\varepsilon_{2i,r}^{out}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産量の観測値と推計値の乖離  
 $\varepsilon_{2i,r}^{exp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量の観測値と推計値の乖離  
 $\varepsilon_{2i,r}^{imp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量の観測値と推計値の乖離  
 $\varepsilon_{2i,r}^{dom}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費量の観測値と推計値の乖離  
 $\varepsilon_{2i,r}^{stc}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量の観測値と推計値の乖離  
 $\varepsilon_{3i,r,s}^{exp}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{3i,r,s}^{imp}$ : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{4r,s}^{exp}$ : 地域  $r$  から地域  $s$  へのスクラップの輸出量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{4r,s}^{imp}$ : 地域  $r$  から地域  $s$  へのスクラップの輸出量の観測値と推計値の乖離

## ・ 既知変数

### 貨幣フロー

$\overline{v_{i,r}^{out}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産額

$\overline{v_{i,r}^{exp}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出額(fob 価格)

$\overline{v_{i,r}^{imp}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入額(cif 価格)

$\overline{v_{i,r}^{dom}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費額

$\overline{vj_{i,j,r}^{in}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  の投入額

$\overline{vt_{i,r,s}^{exp}}$ : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出額

$\overline{vt_{i,r,s}^{imp}}$ : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸入額

### 物量フロー観測値

$\overline{s_{i,r}^{out}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{exp}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{imp}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{dom}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{stc}}$ : 地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量の観測値

$\overline{s_{2i,r,s}^{exp}}$ : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出量の観測値

$\overline{s_{2i,r,s}^{imp}}$ : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸入量の観測値

$\overline{s_{3r,s}^{exp}}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  へのスクラップの輸出量の観測値

$\overline{s_{3r,s}^{imp}}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  へのスクラップの輸出量の観測値

## 設定変数

$\overline{cwg i_{i,j,k,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

$\overline{cwg k_{k',k,j,r}}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k'$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

$\overline{cwo_{k,j,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における統計から別途推計する廃棄物  $k$  の産出量

$\overline{ceoi_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

$\overline{ceo_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

$\overline{ceos_{l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における統計から別途推計する排出物  $l$  の産出量

$\overline{cwg w_{j',k,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j'$  から産出された廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入割合(-)

$\overline{cq q_{i,p,j}}$  : 財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い蓄積される蓄積物  $p$  の割合(-)

$\overline{w \epsilon_{1j,k,r}}$  : 廃棄物の投入量誤差  $\epsilon_{1j,k,r}$  に対する重み

$\overline{w \epsilon_{2i,r}^f}$  : 観測値と推計値の乖離  $\epsilon_{i,r}^f$  に対する重み

$\overline{w \epsilon_{3i,r,s}^f}$  : 観測値と推計値の乖離  $\epsilon_{3i,r,s}^f$  に対する重み

$\overline{w \epsilon_{4r,s}^f}$  : 観測値と推計値の乖離  $\epsilon_{4r,s}^f$  に対する重み

$\overline{w j_{i,j,r}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内投入の部門間の物質密度の誤差の重み

## (2) 物質収支調整計算で用いる集合一覧

$r \in R$  : 地域の集合

$s \in S$  : 地域の集合

$i \in I$  : 財の集合

$j \in J$  : 部門の集合

$k \in K$  : 廃棄物の集合

$n \in N$  : 環境投入物の集合

$l \in L$ : 環境排出物の集合

$p \in P$ : 蓄積物の集合

$f \in F$ : 生産 "*out*"、輸出 "*exp*"、輸入 "*imp*"、地域内消費 "*dom*"、在庫増減 "*stc*" の集合

## 第9章 過去 30 年における世界全域の物質フロー

第 7 章、第 8 章では、線形計画法を用いた物質フローの推計手法を示し、その手法を 2001 年に適用した。しかし、その推計手法には改善の余地があることがわかった。そこで、本章では、その問題点を示し、その解決法を示す。

また、その改善した物質フローの推計手法を過去 30 年間 1971-2000 年に適用し、物質フローの時系列的な変化を分析した。その主たる結果は以下のとおりである。

- (1) 世界全体では対象期間の 30 年間に於いて、物質フローの投入量は増加してきて、炭素、窒素、リン、鉄はその投入量が 1.5-1.8 倍となった。対象期間の 30 年間に於いて GDP は 2.5 倍、人口は 1.6 倍となったため、人口と物質フローの増加率は同程度であったが、GDP と比べるとその増加率は低かった。
- (2) 先進国、新興国、途上国という区分で見ると、先進国は GDP に対する物質投入量(直接物質投入強度)の減少割合が大きく、新興国、途上国地域ではその減少割合が小さかった。
- (3) 直接物質投入強度と一人当たり GDP の関係に注目すると、炭素、窒素、リンは同じような傾向を示し、一人当たり GDP が上がっていくにつれて、直接物質投入強度が減少する。
- (4) 鉄の直接物質投入強度は上記の 3 種の物質とは異なる傾向を示し、以下の 2 つの経路をたどる地域がある。その一つ目は、経済発展が初期の段階では急激に直接物質投入強度が増加し(一人当たり GDP(2000US\$ppp 価格)で 10000US\$程度まで)、それ以降は経済発展とともに減少するという経路である。もう一つは経済発展が初期の段階でもそれほど直接物質投入強度が上がらず、そのまま経済発展とともに自然に減少するというものである。

### 9.1 物質収支調整計算の問題点

本節では、前章までで用いた物質収支調整計算の問題点を示す。前章までで用いた物質収支調整計算は観測値と推計値の間の乖離、各地域内の財の物質密度(価格)の乖離を重みつき絶対誤差率の最小化関数を用いていた。そのような最小化関数を用いた場合、重みの設定の方法次第で、解が大きく変わり、モデルの頑健性がないことを示す。

ここでは、話を単純化するために貨幣フローは扱わず物質フローのみを考え、さらに貿易を行わず、ある地域内における生産と消費のみがある市場を仮定する。ある国、ある財の物質の生産を  $qo$ 、国内消費を  $qd$  とする。財の収支条件より以下の式が成り立つ。

$$qo = qd, \quad qo \geq 0, qd \geq 0 \quad (9.1)$$

次に、物質フローの生産、国内消費についてそれぞれ観測値  $\overline{so}$ 、 $\overline{sd}$  が存在するとする。物質フローの生産、国内消費の観測値と推計値の乖離度を  $\varepsilon o$ 、 $\varepsilon d$  とし、以下のように表す。

$$qo = \overline{so} \cdot (1 + \varepsilon o), \quad \varepsilon o \geq -1 \quad (9.2)$$

$$qd = \overline{sd} \cdot (1 + \varepsilon d), \quad \varepsilon d \geq -1 \quad (9.3)$$

それぞれの観測値に対する重み  $\overline{wo}$ 、 $\overline{wd}$  を用いて、最小化関数は以下ようになる。

$$L = \overline{wo} \cdot |\epsilon o| + \overline{wd} \cdot |\epsilon d| \rightarrow \min \quad (9.4)$$

この問題の解はいかなるものかを示す。そのために、 $\overline{so} \geq \overline{sd}$  という仮定をおく。ここまでの式群で生産と国内消費は置換可能な変数となっているため、この仮定は解の検討に影響を与えない。式(9.1)から式(9.4)から  $qo$ 、 $qd$  を消去すると、 $\epsilon o$ 、 $\epsilon d$  は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \overline{so} \cdot (1 + \epsilon o) &= \overline{sd} \cdot (1 + \epsilon d) \\ \Rightarrow \epsilon o &= \frac{\overline{sd}}{\overline{so}} \cdot (1 + \epsilon d) - 1 \end{aligned} \quad (9.5)$$

これを最小化関数に代入すると、最小化関数は以下の式(9.6)となる。

$$\begin{aligned} L &= \overline{wo} \cdot |\epsilon o| + \overline{wd} \cdot |\epsilon d| \\ &= \overline{wo} \cdot \left| \frac{\overline{sd}}{\overline{so}} \cdot (1 + \epsilon d) - 1 \right| + \overline{sd} \cdot |\epsilon d| \\ &= \begin{cases} \overline{wo} \cdot \frac{\overline{sd} - \overline{so}}{\overline{so}} + \frac{\overline{wo} \cdot \overline{sd} + \overline{wd} \cdot \overline{so}}{\overline{so}} \cdot \epsilon d & \epsilon d \geq 0, \epsilon d \geq \frac{\overline{so}}{\overline{sd}} - 1 \\ -\overline{wo} \cdot \frac{\overline{sd} - \overline{so}}{\overline{so}} + \frac{-\overline{wo} \cdot \overline{sd} + \overline{wd} \cdot \overline{so}}{\overline{so}} \cdot \epsilon d & \epsilon d \geq 0, \epsilon d \leq \frac{\overline{so}}{\overline{sd}} - 1 \\ \overline{wo} \cdot \frac{\overline{sd} - \overline{so}}{\overline{so}} + \frac{\overline{wo} \cdot \overline{sd} - \overline{wd} \cdot \overline{so}}{\overline{so}} \cdot \epsilon d & \epsilon d \leq 0, \epsilon d \geq \frac{\overline{so}}{\overline{sd}} - 1 \\ -\overline{wo} \cdot \frac{\overline{sd} - \overline{so}}{\overline{so}} - \frac{\overline{wo} \cdot \overline{sd} + \overline{wd} \cdot \overline{so}}{\overline{so}} \cdot \epsilon d & \epsilon d \leq 0, \epsilon d \leq \frac{\overline{so}}{\overline{sd}} - 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (9.6)$$

この  $\epsilon d$  と  $L$  との関係をグラフで示すと図 9.1 のようになる。

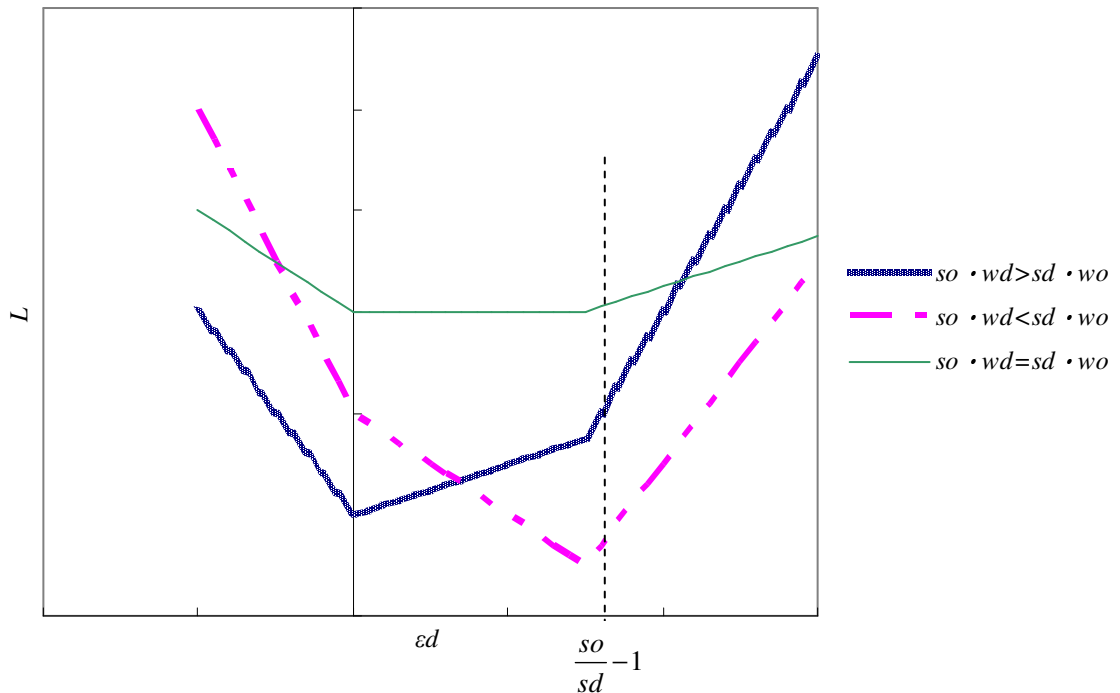


図 9.1  $\epsilon d$  と目的関数  $L$  の関係

最小となる点は、 $\overline{wo} \cdot \overline{sd} - \overline{wd} \cdot \overline{so}$  の符号による。 $\overline{wo} \cdot \overline{sd} - \overline{wd} \cdot \overline{so}$  の符号は観測値と重みの設定に依存する。その重みのつけ方で、 $\epsilon d$  がゼロとなるかもしくは、 $\epsilon d = \frac{\overline{so}}{\overline{sd}} - 1 \rightarrow \epsilon o = 0$  となり、解は生産か国内消費の観測値に完全に偏る。また、 $\overline{wo} \cdot \overline{sd} - \overline{wd} \cdot \overline{so}$  がゼロとなった場合、解が無数に存在する。

ここでは生産と消費しかない状況を仮定したが、これに輸出入などの変数を加えても同様の現象がおき、重みのつけ方によっていずれかの観測値に偏るということが起こることには変わらない。この問題を解決する一つの方法は何らかの非線形関数を目的関数として用いることであり、本研究では重みつき最小二乗法を採用することにした。

## 9.2 推計手法

前節で示したように、線形計画問題を用いた物質調整計算は問題がある。そこで、物質収支調整計算には非線形計画問題を用いる。目的関数を非線形にすること以外は、第7章、第8章で用いた式体系を用いた。モデルを非線形にしたことで、計算能力、ソルバーの求解能力に制約がかかるため、本手法の適用時には対象地域を集約して、24 地域とした。

また、物質フローの勘定体系、廃棄物処理の推計方法は第7章、第8章の方法を用いた。

まず財の物質フローを定式化する。ある地域  $r$ 、財  $i$  の物質の生産量を  $q_{i,r}^{out}$ 、輸出量を  $q_{i,r}^{exp}$ 、輸入量を  $q_{i,r}^{imp}$ 、地域内消費量を  $q_{i,r}^{dom}$ 、在庫増減量を  $q_{i,r}^{stc}$  とする。次に、部門  $j$  における財  $i$  の生産量を  $q_{i,j,r}^{out}$ 、部門  $j$  における財  $i$  の投入量を  $q_{i,j,r}^{in}$  とする。財の生産量と投入量には以下の関係が成り立つ。

$$q_{i,r}^{out} = \sum_{j \in J} q_{i,j,r}^{out} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (9.7)$$

$$q_{i,r}^{dom} = \sum_{j \in J} q_{i,j,r}^{in} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (9.8)$$

ここで、 $R$  は地域の集合を、 $I$  は財の集合を、 $J$  は部門の集合を表す。また、地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出量を  $qt_{i,r,s}$  とすると以下の式が成り立つ。

$$q_{i,r}^{exp} = \sum_s qt_{i,r,s} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (9.9)$$

$$q_{i,s}^{imp} = \sum_{r \in R} qt_{i,r,s} \quad \forall i \in I, s \in S \quad (9.10)$$

ここで、 $S$  は地域の集合を表し、 $R$  と等しい。地域内の財  $i$  の収支条件より、以下の式が成り立つ。

$$q_{i,r}^{out} + q_{i,r}^{imp} + q_{i,r}^{stc} = q_{i,r}^{dom} + q_{i,r}^{exp} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (9.11)$$

次に、財以外の物質について定式化する。ある地域  $r$  における、部門  $j$  から発生する廃棄物を  $qwg_{k,j,r}$ 、廃棄物の部門  $j$  への投入を  $qwi_{k,j,r}$ 、環境からの投入  $n$  を  $qei_{n,j,r}$ 、環境への排出  $l$  を  $qeo_{l,j,r}$ 、ストック  $p$  の追加を  $qq_{p,j,r}$  とする。部門  $j$  について収支条件が成り立つ。

$$\sum_{i \in I} q_{i,j,r}^{\text{"out"}} + \sum_{k \in K} q_{k,j,r}^w + \sum_{l \in L} q_{l,j,r}^{eo} + \sum_{p \in P} q_{p,i,r}^q = \sum_{i \in I} q_{i,j,r}^{\text{"in"}} + \sum_{k \in K} q_{k,j,r}^{wi} + \sum_{n \in N} q_{n,j,r}^{ei} \quad \forall j \in J, r \in R \quad (9.12)$$

ここで、 $K$  は廃棄物の集合、 $N$  は環境投入物の集合、 $L$  は環境排出物の集合、 $P$  は蓄積物の集合を表す。廃棄物、環境投入物、環境排出物、蓄積物のフローの推計式は第 7 章、第 8 章と同一のものをを用いるため、ここでは省略する。

次に、観測値と推計値の関係について記述する。物質フローの生産、輸出、輸入、地域内消費、在庫増減についてそれぞれ観測値  $\overline{s_{i,r}^{\text{"out"}}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{\text{"exp"}}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{\text{"imp"}}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{\text{"dom"}}}$ 、 $\overline{s_{i,r}^{\text{"stc"}}}$  が存在する場合がある。生産、輸出、輸入、地域内消費、在庫増減の観測値と推計値の乖離を  $\varepsilon_{i,r}^{\text{"out"}}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{\text{"exp"}}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{\text{"imp"}}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{\text{"dom"}}$ 、 $\varepsilon_{i,r}^{\text{"stc"}}$  とする。さらに、 $Q(x)$  をある変数  $x$  が存在するという述語と定義すると、以下のように記述される。

$$q_{i,r}^{\text{"out"}} = \overline{s_{i,r}^{\text{"out"}}} \cdot \varepsilon_{i,r}^{\text{"out"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{\text{"out"}}}\right) \quad (9.13)$$

$$q_{i,r}^{\text{"exp"}} = \overline{s_{i,r}^{\text{"exp"}}} \cdot \varepsilon_{i,r}^{\text{"exp"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{\text{"exp"}}}\right) \quad (9.14)$$

$$q_{i,r}^{\text{"imp"}} = \overline{s_{i,r}^{\text{"imp"}}} \cdot \varepsilon_{i,r}^{\text{"imp"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{\text{"imp"}}}\right) \quad (9.15)$$

$$q_{i,r}^{\text{"dom"}} = \overline{s_{i,r}^{\text{"dom"}}} \cdot \varepsilon_{i,r}^{\text{"dom"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{\text{"dom"}}}\right) \quad (9.16)$$

$$q_{i,r}^{\text{"stc"}} = \overline{s_{i,r}^{\text{"stc"}}} \cdot \varepsilon_{i,r}^{\text{"stc"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{s_{i,r}^{\text{"stc"}}}\right) \quad (9.17)$$

次に、物質密度を定義する。物質密度とは一単位当たりの物質質量であり、価格の逆数である。地域  $r$ 、財  $i$  の生産、輸出、輸入、地域内消費の物質密度をそれぞれ  $d_{i,r}^{\text{"out"}}$ 、 $d_{i,r}^{\text{"exp"}}$ 、 $d_{i,r}^{\text{"imp"}}$ 、 $d_{i,r}^{\text{"dom"}}$ 、部門  $j$  における財  $i$  の投入の物質密度を  $d_{i,j,r}^{\text{"in"}}$  とする。また、貨幣の生産、輸出、輸入、地域内消費をそれぞれ  $\overline{v_{i,r}^{\text{"out"}}}$ 、輸出を  $\overline{v_{i,r}^{\text{"exp"}}}$ 、輸入を  $\overline{v_{i,r}^{\text{"imp"}}}$ 、地域内消費を  $\overline{v_{i,r}^{\text{"dom"}}}$ 、部門  $j$  への投入を  $\overline{v_{i,j,r}^{\text{"in"}}}$  とする。それぞれの金額は、税金を含めた額であるとし、輸出は fob、輸入は cif 価格とする。

$$q_{i,r}^{\text{"out"}} = \overline{v_{i,r}^{\text{"out"}}} \cdot d_{i,r}^{\text{"out"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{\text{"out"}}}\right) \quad (9.18)$$

$$q_{i,r}^{\text{"exp"}} = \overline{v_{i,r}^{\text{"exp"}}} \cdot d_{i,r}^{\text{"exp"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{\text{"exp"}}}\right) \quad (9.19)$$

$$q_{i,r}^{\text{"imp"}} = \overline{v_{i,r}^{\text{"imp"}}} \cdot d_{i,r}^{\text{"imp"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{\text{"imp"}}}\right) \quad (9.20)$$

$$q_{i,r}^{\text{"dom"}} = \overline{v_{i,r}^{\text{"dom"}}} \cdot d_{i,r}^{\text{"dom"}} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{\text{"dom"}}}\right) \quad (9.21)$$

$$q_{i,j,r}^{\text{"in"}} = \overline{v_{i,j,r}^{\text{"in"}}} \cdot d_{i,j,r}^{\text{"in"}} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,j,r}^{\text{"in"}}}\right) \quad (9.22)$$



地域  $r$ 、財  $i$  における生産と輸出の物質密度の比を  $e_{i,r}^{exp}$ 、地域内消費と輸入の物質密度の比を  $e_{i,r}^{imp}$ 、とし、地域内消費の物質密度と各部門  $j$  における投入との比を  $edd_{i,j,r}$  とする。

$$d_{i,r}^{out} = e_{i,r}^{exp} \cdot d_{i,r}^{exp} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{out}}\right) \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{exp}}\right) \quad (9.23)$$

$$d_{i,r}^{dom} = e_{i,r}^{imp} \cdot d_{i,r}^{imp} \quad \forall i \in I, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{dom}}\right) \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{imp}}\right) \quad (9.24)$$

$$d_{i,j,r}^{in} = edd_{i,j,r} \cdot d_{i,r}^{dom} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \wedge Q\left(\overline{v_{i,r}^{dom}}\right) \wedge Q\left(\overline{v_{j,i,r}^{in}}\right) \quad (9.25)$$

また、地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出の物質密度を  $dt_{i,r,s}^{exp}$  とし、輸出額を  $\overline{vt_{i,r,s}^{exp}}$  とすると以下の式が成り立つ。

$$qt_{i,r,s} = \overline{vt_{i,r,s}^{exp}} \cdot dt_{i,r,s}^{exp} \quad \forall i \in I, s \in S, r \in R \wedge Q\left(\overline{vt_{i,r,s}^{exp}}\right) \quad (9.26)$$

地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出の物質密度と世界の貿易の平均的な輸出物質密度  $dw_i$  の比を  $et_{i,r,s}$  とすると以下のように表される。

$$dt_{i,r,s}^{exp} = et_{i,r,s} \cdot dw_i \quad \forall i \in I, s \in S, r \in R \wedge Q\left(\overline{vt_{i,r,s}^{exp}}\right) \quad (9.27)$$

$$dw_i = \frac{\sum_{r \in R} q_{i,r}^{exp}}{\sum_{r \in R} \overline{v_{i,r}^{exp}}} \quad \forall i \in I \quad (9.28)$$

以上の観測値と推計値の比、物質密度の比を用いて最小化する目的関数を以下のようにする。ここで、集合  $F$  は生産"out"、輸出"exp"、輸入"imp"、地域内消費"dom"、在庫増減"stc"を表し、その要素を  $f$  とする。また、輸出、輸入のみを要素として持つ  $F$  の部分集合を  $Ft$  とする。

$$L = \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \overline{w \mathcal{E}_{i,r}^f} \cdot (1 - \mathcal{E}_{i,r}^f)^2 + \sum_{f \in Ft} \sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \overline{w e_{i,r}^f} \cdot (1 - e_{i,r}^f)^2 \\ + \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \overline{w j_{i,j,r}} \cdot (1 - edd_{i,j,r})^2 + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \overline{w t_{i,r,s}^f} \cdot (1 - et_{i,r,s})^2 \quad (9.29)$$

ここで、 $\overline{w \mathcal{E}_{i,r}^f}$ 、 $\overline{w e_{i,r}^f}$ 、 $\overline{w j_{i,j,r}}$ 、 $\overline{w t_{i,r,s}^f}$  はそれぞれの乖離に対する重みである。

## 9.3 適用と結果の検証

### 9.3.1 対象

全世界 1971 年から 2000 年の 30 年間に適用した。全世界を表 9.1 に示す 24 地域に分割した。対象物質は炭素・窒素・リン、鉄である。

表 9.1 地域分割

地域名			
オーストラリア	インドネシア	メキシコ	その他欧州
ニュージーランド	タイ	中米	CIS
その他オセアニア	インド	アルゼンチン	中東
中国	その他アジア	ブラジル	北アフリカ
日本	カナダ	その他南米	南アフリカ
韓国	アメリカ	EU15	その他アフリカ

### 9.3.2 結果の検証

本項では、前章までで示した線形計画法を用いた推計方法と、本章で示した非線形計画法を用いた方法で結果がどのように変わったかを示す。比較には、[1]価格の標準偏差、[2]物量フローの観測値と推計値の平方平均誤差、[3]平方平均誤差率の 3 つの指標を用いる。重みのつけ方を変化させて、各モデルを実行することで、上記の比較指標がどのように変化するかを見てみる。対象としたのは 2000 年で、比較するのは、米、小麦の二つの財とした。ここでこの 2 財を選んだのは、この 2 つの財が合成財ではなく、単一の財として扱われており、価格のばらつきが比較的小さいものと考えられることと、穀物の中でも主要なものであるためである。

重みは、上記で設定した重み  $\overline{we_{i,r}^f}$ 、 $\overline{wj_{i,j,r}}$ 、 $\overline{wt_{i,r,s}^f}$  に 0.1 倍、0.2 倍と順番に 0.1 倍刻みで増加させ 2 倍までの 20 通りの設定を行った。これら 3 つの重みは物質密度の差にかかる重みであり、この重みが大きいほど、物質フローの生産量などの統計情報よりも物質密度の差が小さくするようになる。価格の標準偏差は、米、小麦それぞれについてすべての地域の生産、輸出、輸入、地域内消費の 4 種類の価格から計算した。平方平均誤差( $RMSE_i$ )、平方平均誤差率( $RMSE\_rate_i$ )は、以下の式で求める。

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_f \sum_i \sum_r (q_{i,r}^f - s_{i,r}^f)^2} \quad (9.30)$$

$$RMSE\_rate_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_f \sum_i \sum_r \frac{(q_{i,r}^f - s_{i,r}^f)^2}{s_{i,r}^f}} \quad (9.31)$$

図 9.2、図 9.3、図 9.4 には、それぞれ米、小麦の価格の標準偏差、推計値と観測値の平方平均誤差、平方平均誤差率を示す。これらの図の右軸は米、左軸は小麦を表している。

まずは、図 9.2 の価格の標準偏差から見てみる。全体として重みがあがるほど、価格の標準偏差は小さくなる。非線形モデルでは米、小麦とも重みによって大きく変化する年はいなかったが、線形モデルでは重みによって大きく変化する年があることがわかる。特に小麦は重みの倍率が 0.9 となったところで急激に変化した。米も重みの倍率が 0.8 で急激に変化する。これらから、重みの設定により価格のばらつきが大きく変わる可能性があることがわかる。

次に、推計値と観測値の平方平均誤差を見てみる(図 9.3)。重みが大きくなるほど、推計値と観測値は離れていく。非線形はなだらかに変化していくが、線形はやや階段状になって変化している。誤差量は小麦では非線形の方が線形よりも小さく、米では非線形の方

が線形よりも大きな傾向にあり、どちらの方法のほうが観測値と推計値の乖離が大きいといふことはここからはいえない。しかし、平方平均誤差率を見ると、線形が極めて大きなジャンプをしていることがわかる(図 9.4)。

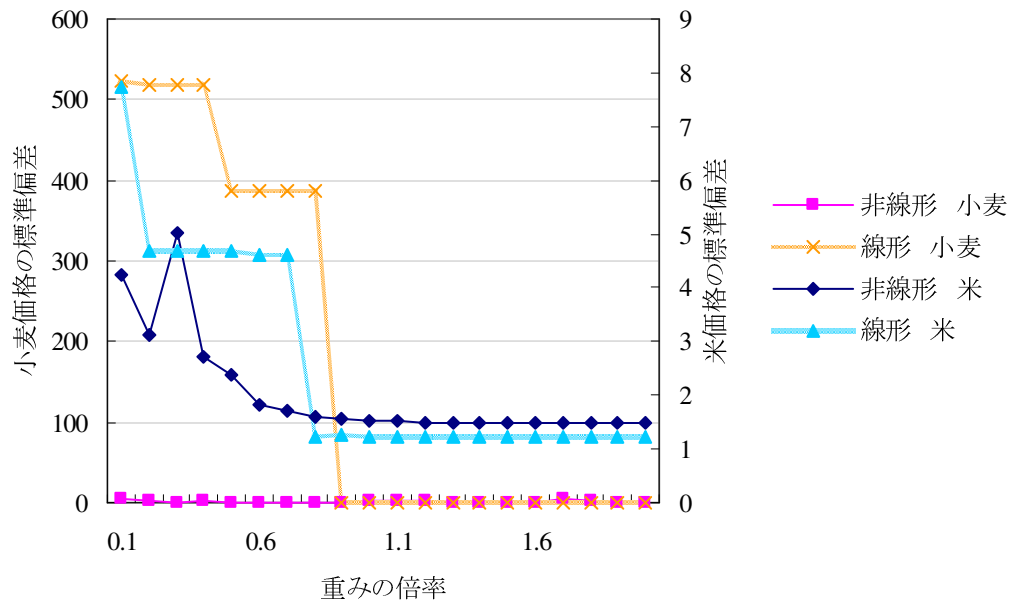


図 9.2 価格の標準偏差

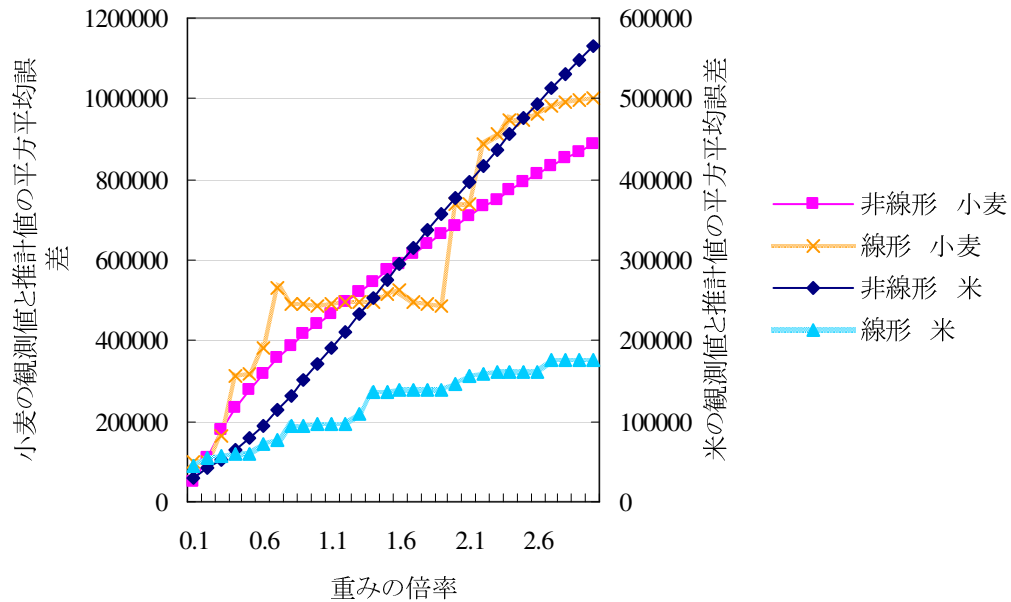


図 9.3 観測値と推計値の平方平均誤差

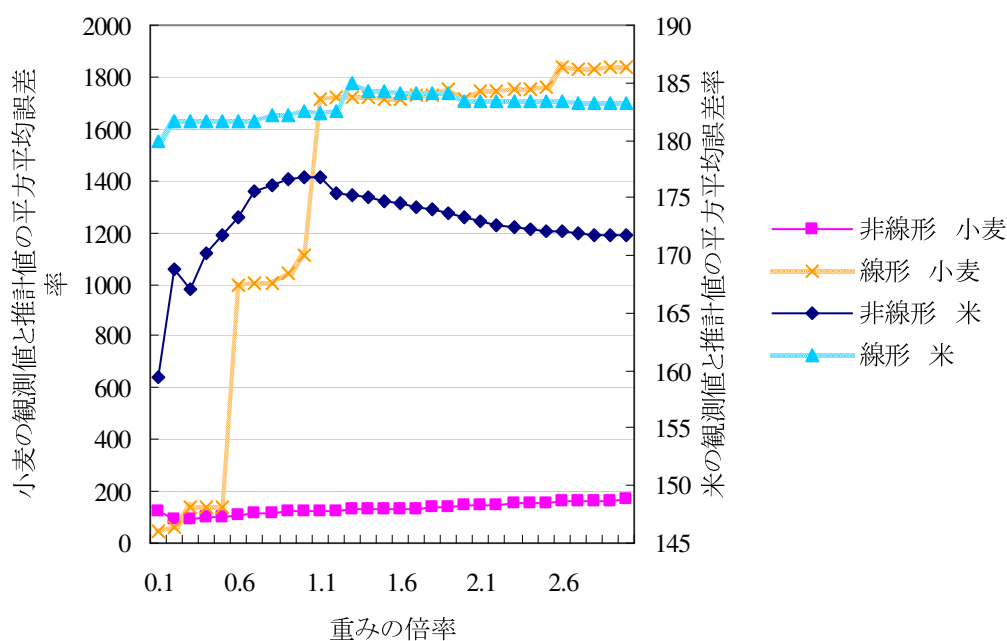


図 9.4 観測値と推計値の平方平均誤差率

以上の結果から以下のことが言える。貨幣フローに関する情報を所与として、物量フローの観測値と推計値の乖離を小さくし、かつ価格の乖離を小さくするというを行う場合、観測値と推計値の乖離と価格の乖離はトレードオフの関係にある。そして、前章までで用いた線形モデル、本章で示した非線形モデル、いずれのモデルでも、相対的な重みの設定が、観測値と推計値の乖離を重視(問題視)するか、価格の乖離を重視(問題視)するかを決定している。ただし、線形モデルは重みの設定の仕方、大きく推計値が変化してしまう。線形モデルが重みの設定に対して頑健でないことがわかり、非線形モデルのほうがより解の安定性と妥当性があることが示された。

## 9.4 結果および考察

本節では前節の手法で得られた結果を示す。

### 9.4.1 過去 30 年間ににおける炭素フロー

#### (1) 環境投入物の投入量

環境投入物の投入量について見てみる。世界全体で見ると、環境投入物の投入総量は、1971 年から 2000 年の 30 年間で約 1.5 倍となった(9390TgC→14479TgC)。図 9.5 からわかるように、化石燃料の占める割合が最も大きく、次いで農業、畜産業・漁業、林業という順番で割合が大きかった。

内訳を 1971 年と 2000 年で比較してみる。図 9.6 は 1971 年と 2000 年における投入量の内訳を表している。1971 年、2000 年を比べるとその内訳の割合はほとんど変化していないことがわかる。化石燃料が 46%から 48%へ、農業が 24%から 27%へと増加したが、林業が 12%から 10%へ、畜産・漁業が 18%から 15%へと減少した。

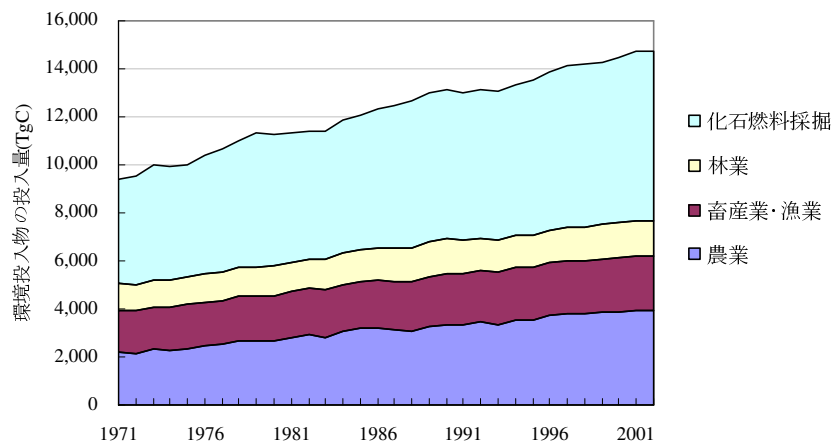


図 9.5 炭素の環境投入物の投入量推移(TgC/年)

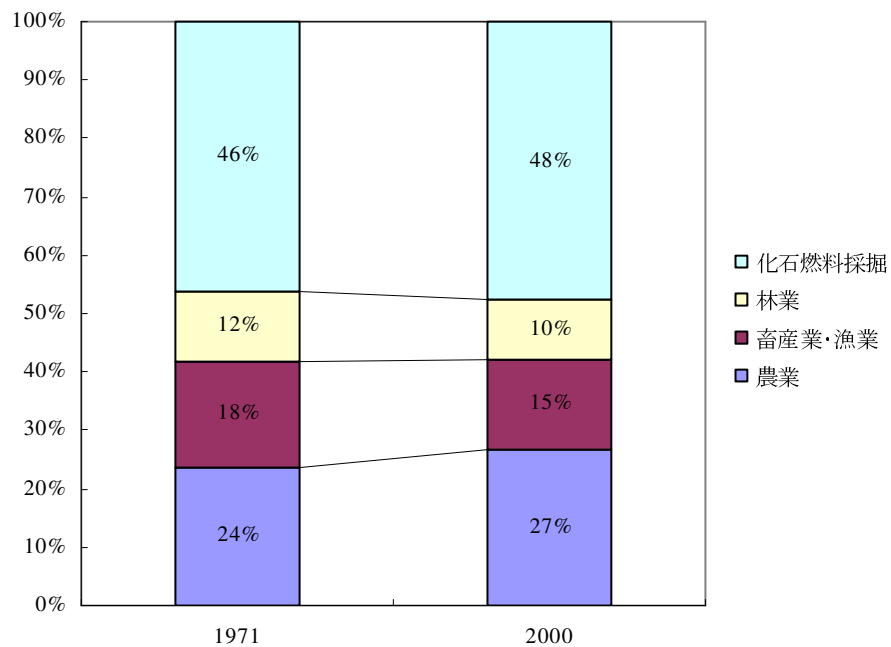


図 9.6 炭素の環境投入物の内訳の変化

次に地域別で見てみる。2000 年における環境投入物の総投入量の内訳を地域別上位 10 地域で示したものが、図 9.7 である。アメリカ、中国、CIS、中東、インド、EU15 という順番となった。農業、化石燃料の生産が盛んな地域が上位となる。それに対して日本は世界全体に対する比率は小さく 1%以下であり、図中ではその他の一部となった。

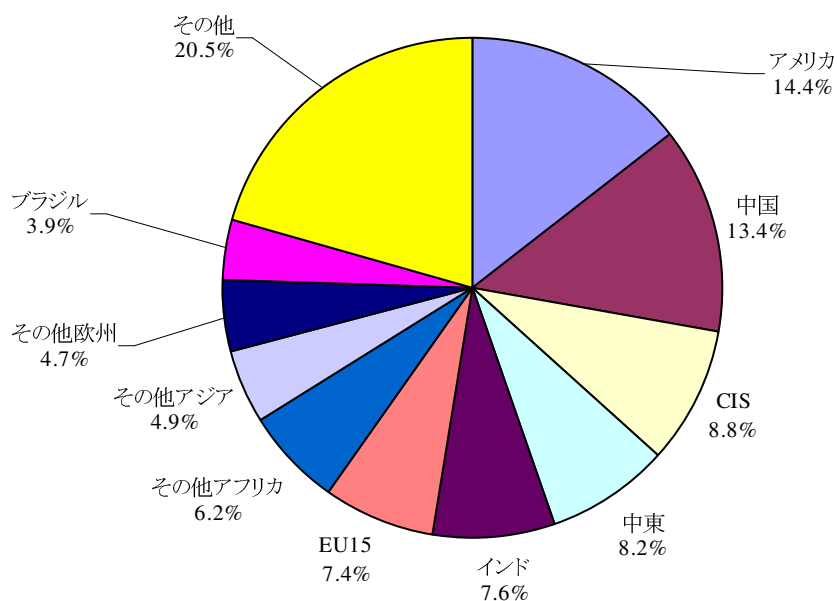


図 9.7 2000 年における炭素の環境投入物の投入量の上位 10 地域の内訳

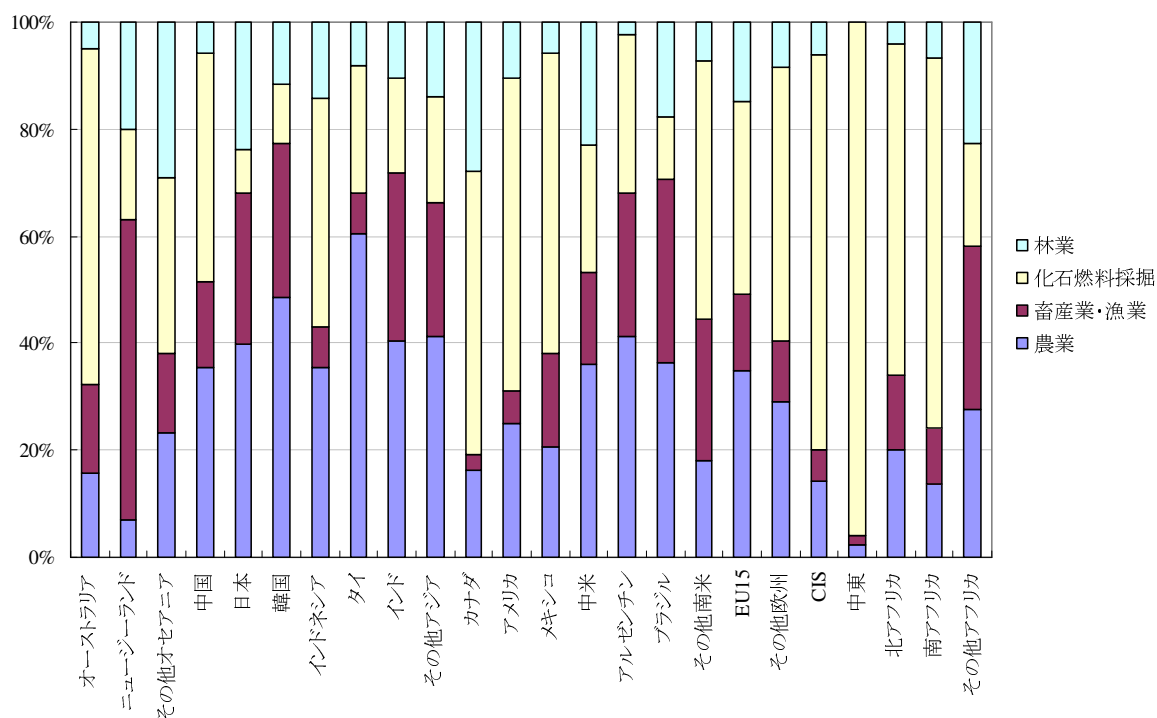


図 9.8 炭素の環境投入物の部門別内訳

国別の投入部門の内訳を見てみると(図 9.8)、日本、中国、韓国、タイ、インドなどアジア地域は農業、畜産業の割合が比較的高いが、北米、中東、CIS、アフリカでは化石燃料の割合が高い。EU は比較的平均的な割合をとっている。投入している炭素の内訳は国・地域によって大きく異なる。

## (2) 直接物質投入量

次に、各地域の直接物質投入量（DMC; Direct Material Consumption）について見てみる。ここで DMC とは、一次産品(農産物、畜産物、化石燃料)の生産量から、すべての財の輸出量を減じ、輸入量を足した量である。2000 年における DMC の内訳を地域別上位 10 地域で示したものが、図 9.9 である。

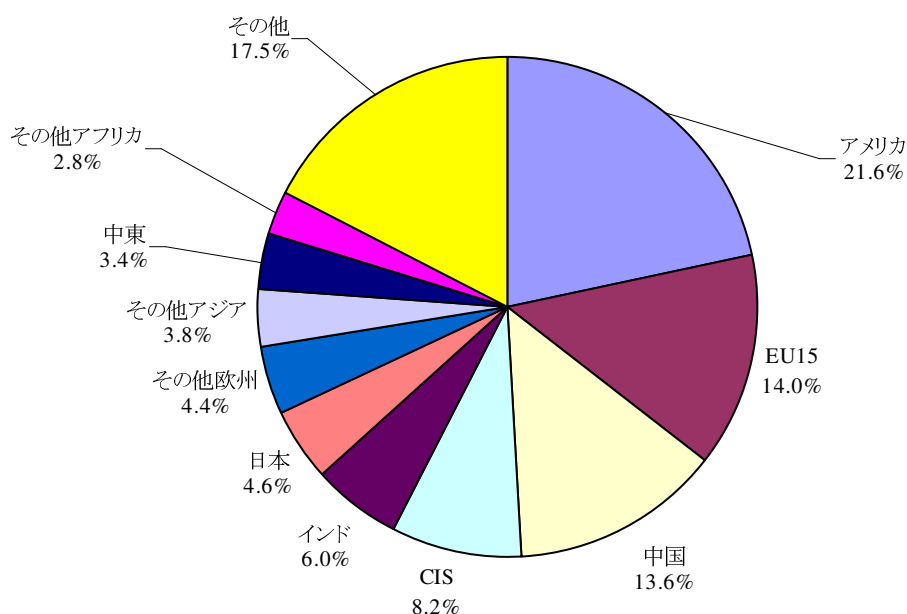


図 9.9 2000 年における炭素の直接物質投入量の上位 10 地域の内訳

上位国の中でもアメリカ、EU15、日本などは環境投入物よりも世界全体に占める割合が大きくなっている。特に日本は世界全体に占める環境投入物の投入量の割合が 1%未満であったのに対して、直接国内投入量の割合は 4.6%となり増加している。これは、多くの炭素を輸入に依存していることを意味する。上位国の中でも中国、CIS は世界全体に占める割合が環境投入物とほとんど変わらなかった。

次に、DMC を時系列的に見てみる。1971 年の DMC を 1 としたときの、各地域の変化率を図 9.10 に示す。この 30 年間ほとんどの地域で DMC は増加していることがわかる。例外となったのは CIS のみであった。とりわけ増加率が大きかったのは、韓国、中東であり、5 倍以上の増加となった。次いで、タイ、北アフリカ、中国、メキシコ、インド、インドネシアの増加が大きかった。ここで挙げた地域は、産油国である中近東、もしくは東アジア・東南アジアといったここ 30 年で急速に経済発展した国々であった。一方、日本、アメリカ、EU15 といった先進地域の変化率は小さく、それぞれこの 30 年間で 1.5 倍、1.4 倍、1.0 倍となった。

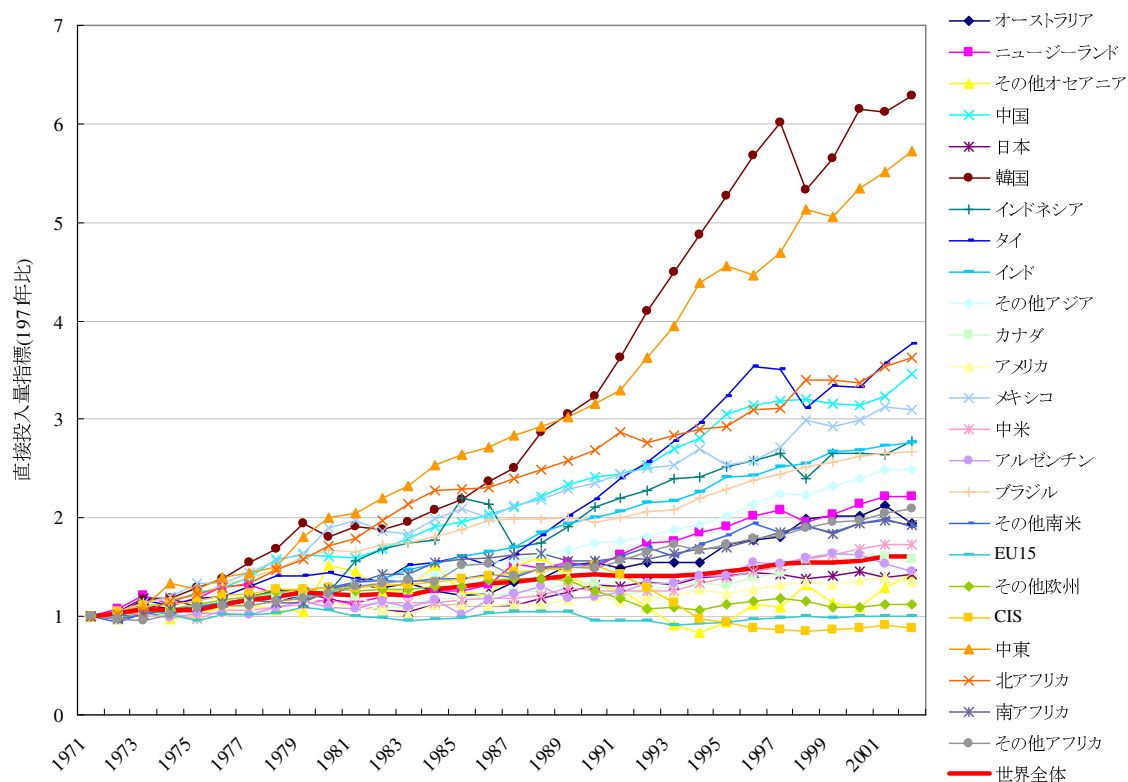


図 9.10 1971 年を 1 とした地域別の炭素の直接物質投入量の推移

次に、GDP(US\$ppp 価格)あたりの直接物質投入量を見てみる。図 9.11 は、1971 年の GDP あたりの直接物質投入量(IDMC; Intensity of Direct Material Consumption)を 1 としたときの各地域の経年変化を表している。

世界全体で見ると IDMC は減少傾向にあり、2000 年の値は 1971 年比で 0.61 となった。大部分の地域で IDMC は減少傾向にあった。世界全体の平均よりも減少割合の大きかった地域は、中国、その他オセアニア、インドネシア、EU15、アメリカ、タイ、日本であった。世界全体の平均よりも減少割合の大きかった前述の地域は、DMC の世界全体のシェアも大きな地域である、中国、アメリカ、EU15、日本などを含む(前項参照)。よって、これらの地域の IDMC の減少が世界全体の IDMC 減少に大きく寄与してきたと考えられる。

一方、IDMC が増加したのは、中東、CIS、ニュージーランド、メキシコであった。このうち CIS は旧ソ連の崩壊とともに IDMC が急激に上昇している様子がわかる。DMC では、これほどの大きな変化が見られなかったため、GDP の減少が寄与してこのような変化となったと考えられる。IDMC が減少傾向にあるということは、GDP と炭素の消費量のデカップリングを意味する。つまり、この 30 年間で世界全体、もしくは多くの地域で、GDP と炭素の消費量の間のデカップリングが観測された。



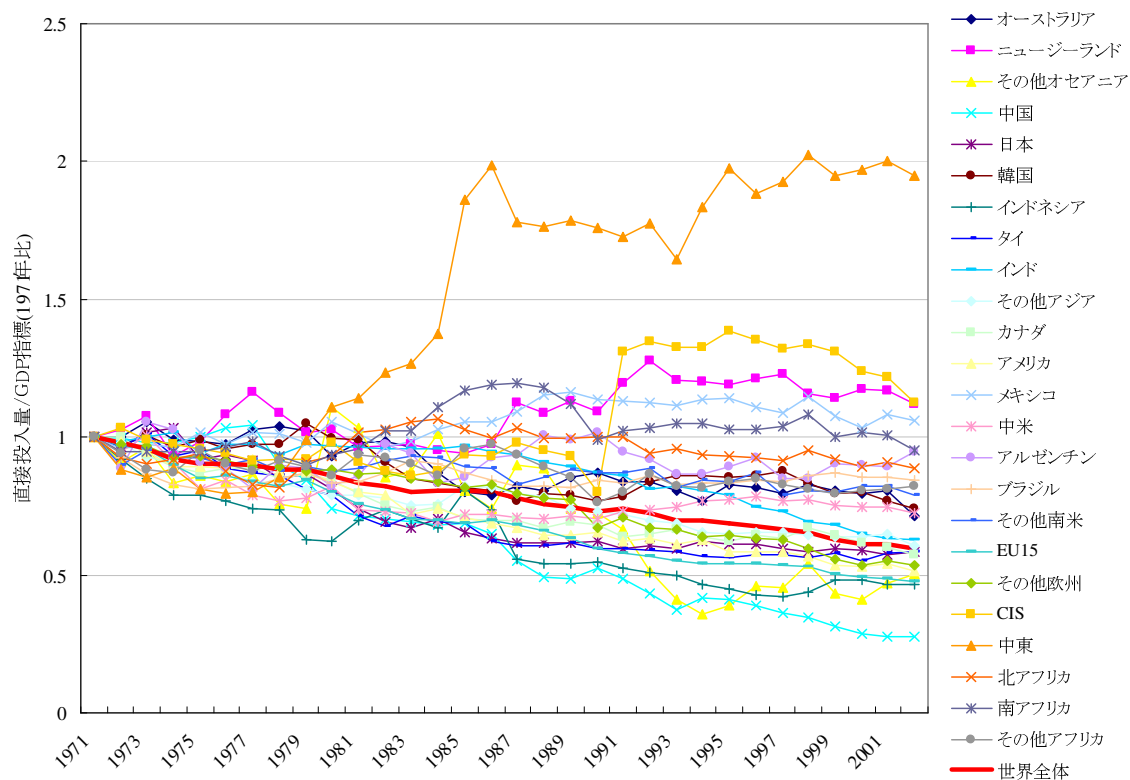


図 9.11 1971 年を 1 とした地域別の GDP あたりの炭素直接物質投入量の推移

## 9.4.2 過去 30 年間にける窒素フロー

### (1) 環境投入物

窒素の環境投入物の投入量を見てみる。図 9.12 は投入物別の環境投入物の投入量の推移を表している。

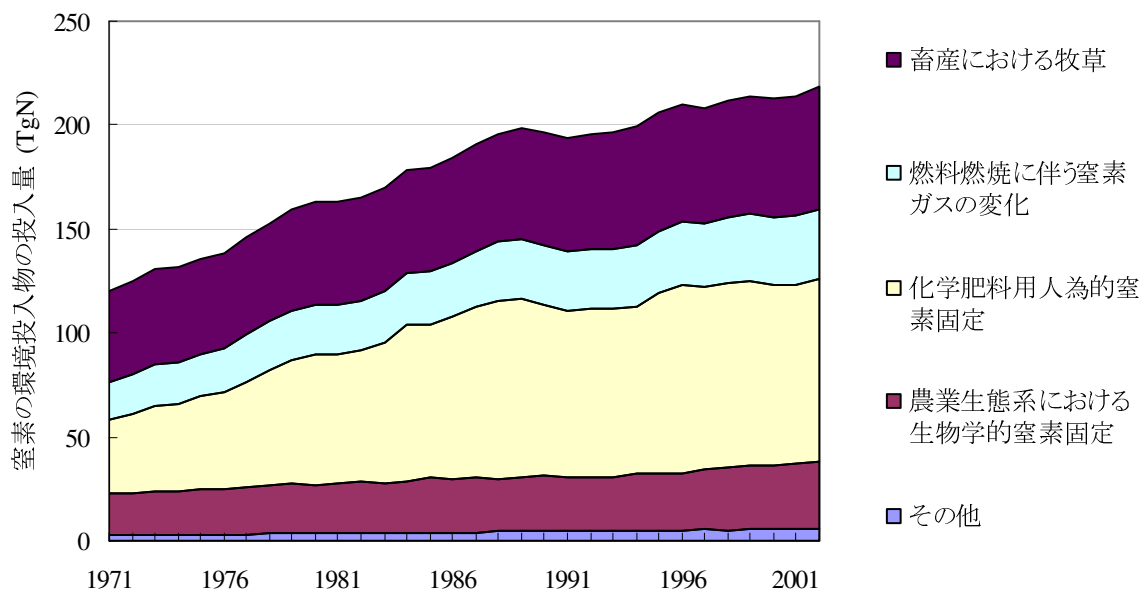


図 9.12 窒素の環境投入物の投入量推移(TgN/年)

窒素の環境投入物の投入総量は、1971年から2000年の30年間で1.8倍となった(120TgN→213TgN)。図からもわかるように、化学肥料用の窒素固定量が最も大きな割合を占めていて、次に畜産における牧草、農業における窒素固定、燃焼に伴う窒素ガスの変化という順番であった。

投入物の内訳を1971年と2000年で比較してみる。図9.13は1971年と2000年における投入量の内訳を表している。炭素の環境投入物の内訳の変化はほとんど観測されなかったが、窒素の環境物の内訳は1971年から2000年で変化していることがわかる。特に変化が大きかったのは化学肥料用の窒素固定と畜産における牧草である。化学肥料用の窒素固定量が大きく増加し、1971年の29.4%から40.6%となったのに対して、畜産では、36.5%から26.8%となった。

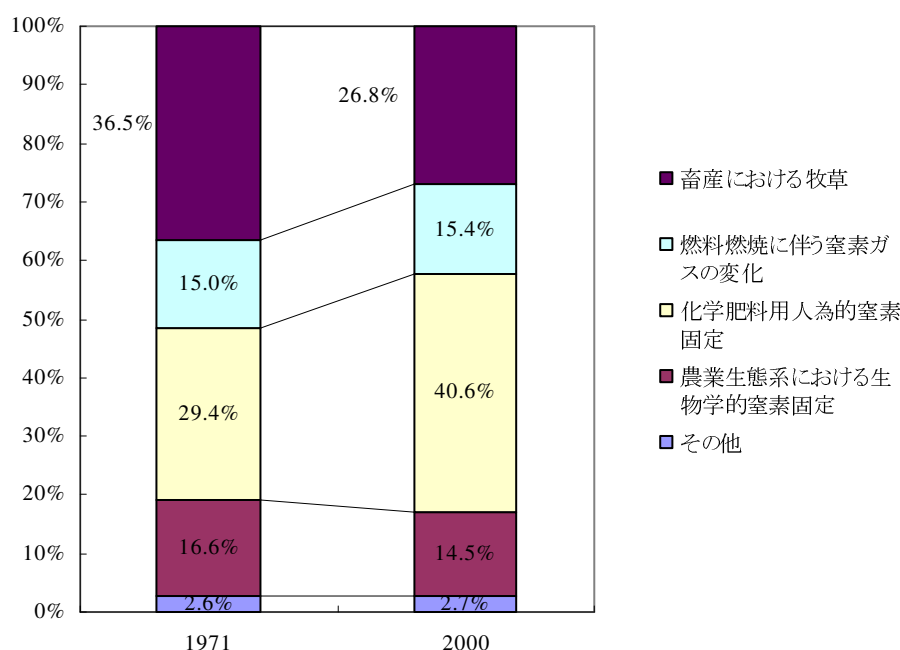


図 9.13 窒素の環境投入物の内訳の変化

次に地域別で環境投入物の投入量を見てみる。2000年における環境投入物の総投入量の内訳を地域別上位10地域で示したものが、図9.14である。中国、アメリカ、インド、CIS、EU15、その他アジア、その他欧州という順番となった。炭素フローと異なる主たる点は、中国とアメリカの順位が異なること、その他アジアが上位地域にあること、中東が上位地域に含まれないことである。アメリカなどの先進国と比べるとアジア地域は相対的に農業の生産量が化石燃料の生産量より大きいため、窒素投入量の占める割合が高くなっていると考えられる。また中東は炭素では化石燃料が多く生産されていたため上位地域となったが、窒素では上位10地域にも入らなかった。

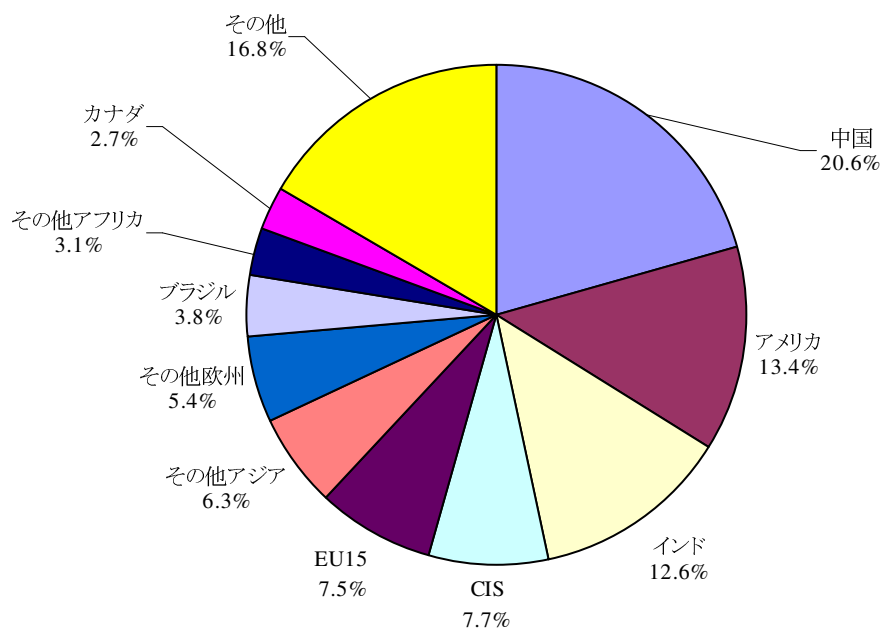


図 9.14 2000 年における窒素の環境投入物の投入量の上位 10 地域の内訳

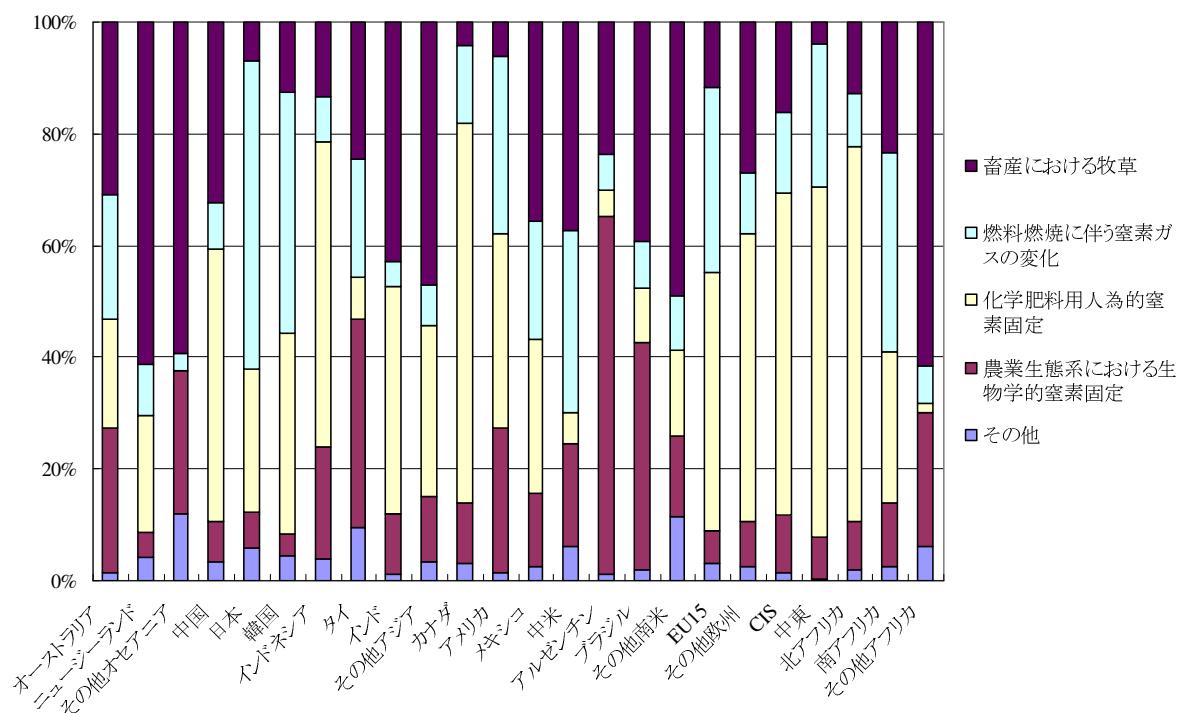


図 9.15 窒素の環境投入物の投入物別内訳

地域別の投入の内訳を図 9.15 に示す。上位地域を比較すると、中国、インドでは化学肥料の窒素固定、畜産における牧草が大きな割合を占めているのに対して、アメリカや EU15 は化学肥料の窒素固定、畜産における牧草、燃料燃焼に伴う窒素ガスの変化がほぼ同じシェアを占めていた。その他アジアは畜産における牧草が大きな割合を占めた。日本

は、農業関係の寄与が小さい代わりに、燃料燃焼による窒素ガスの変化が大きな割合を占めた。

## (2) 直接物質投入量

次に、各地域の直接物質投入量について見てみる。2000 年における DMC の内訳を地域別上位 10 地域で示したものが、図 9.16 である。上位地域に注目すると、中国、アメリカ、インドの割合は環境投入物とシェアがそこまで変わらないが、EU15、CIS はやや異なり、EU15 は直接投入量の方が大きく、CIS ではその逆であった。EU15 は窒素を輸入してきて、CIS は輸出しているということを意味している。環境投入物の内訳と大きな変化がないことがわかる。すなわち、ネットで見た場合、窒素は貿易による移動が小さいことを示唆している。

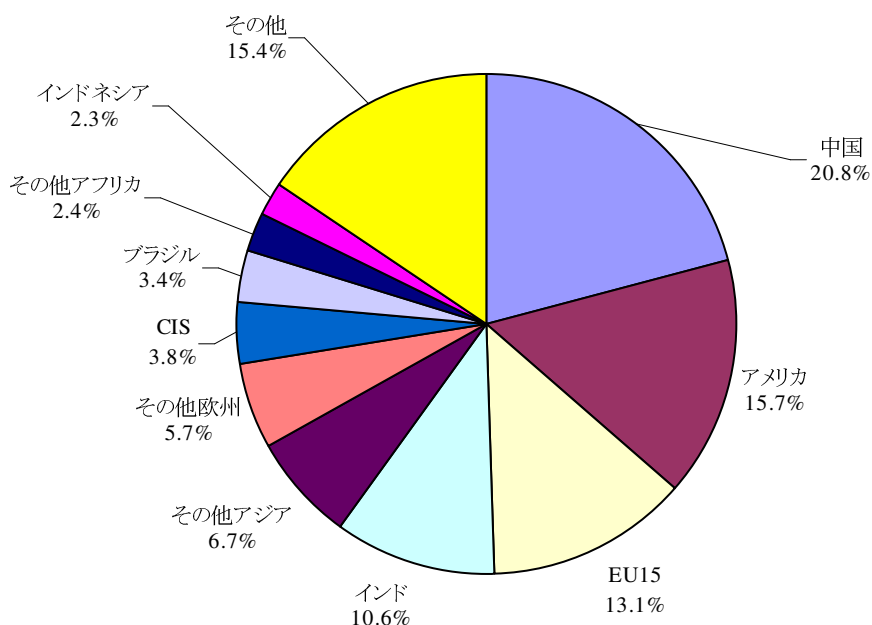


図 9.16 2000 年における窒素の直接物質投入量の上位 10 地域の内訳

次に、DMC を時系列的に見てみる。1971 年の DMC を 1 としたときの、各地域の変化率を図 9.17 に示す。炭素の DMC と同様に、この 30 年間ほとんどの地域で DMC は増加しており、例外となったのは炭素と同様に CIS のみであった。とりわけ増加率が大きかったのは、中国、中東、タイ、ブラジル、インドネシアであった。これらの国は 30 年間で 3.5-4 倍程度の増加となった。一方、炭素で大きな増加率を示した韓国は世界の平均の増加率程度の 2.1 倍に留まった。日本、アメリカ、EU15 に注目してみると、やはり炭素と同様の傾向であり、増加率は大きくなく、それぞれこの 30 年間で 1.2 倍、1.6 倍、1.3 倍となった。

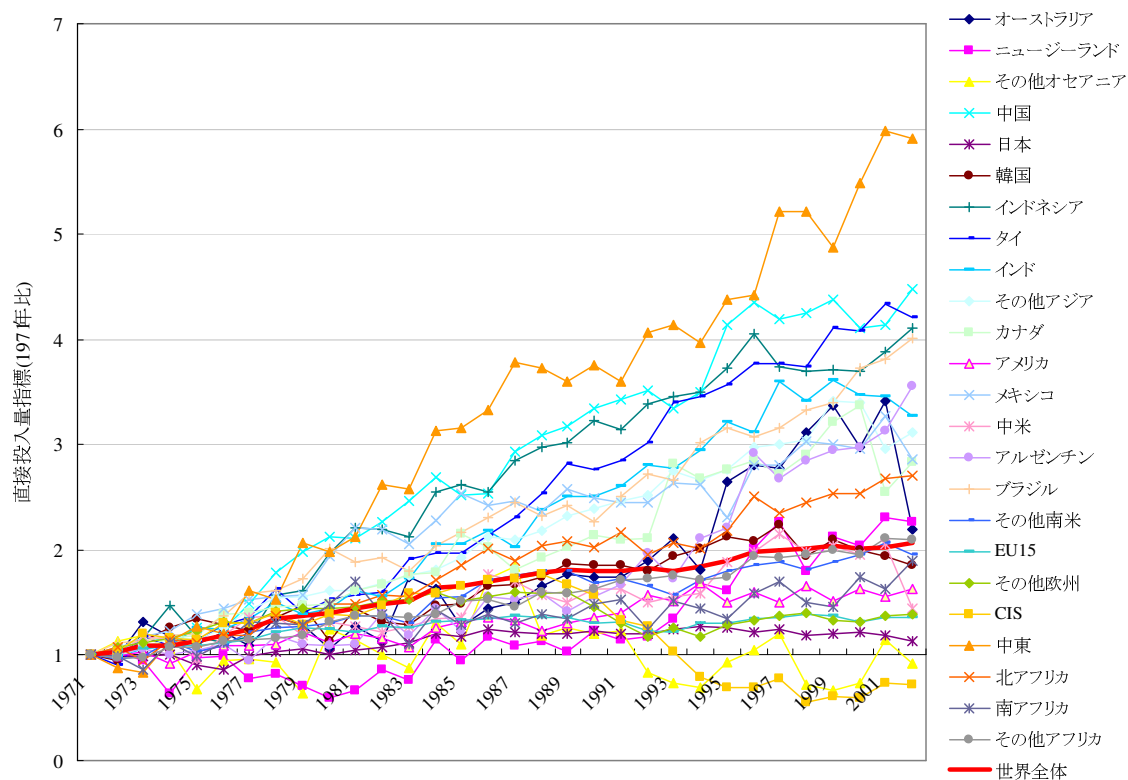


図 9.17 1971 年を 1 とした地域別の炭素の直接物質投入量の推移

次に、GDP(US\$ppp 価格)あたりの直接物質投入量を見てみる。図 9.18 は、1971 年の GDP あたりの直接物質投入量を 1 としたときの各地域の経年変化を表している。世界全体で見ると IDMC は炭素と同様に減少傾向にあるが、その減少割合は炭素フローの減少割合である 0.61 より小さく、2000 年の値は 1971 年比で 0.79 となった。1990 年付近までは世界全体ではほぼ横ばいであったものが、1990 年以降に減少傾向を示した。韓国、中国、その他オセアニア、日本、タイ、インドネシアなどのアジア地域を中心とした地域やアメリカ、EU15 で減少割合が大きかった。一方、アルゼンチン、中東、オーストラリア、ニュージーランド、ブラジル、カナダなどの地域は増加となった。アメリカ、EU15、日本、中国、インドなどの経済規模、窒素の投入量の大きな地域は、GDP と直接物質投入量の間でデカップリングが見られたが、南米やオセアニア地域などの資源国、農業国、産油国ではそういったデカップリングは見られなかった。

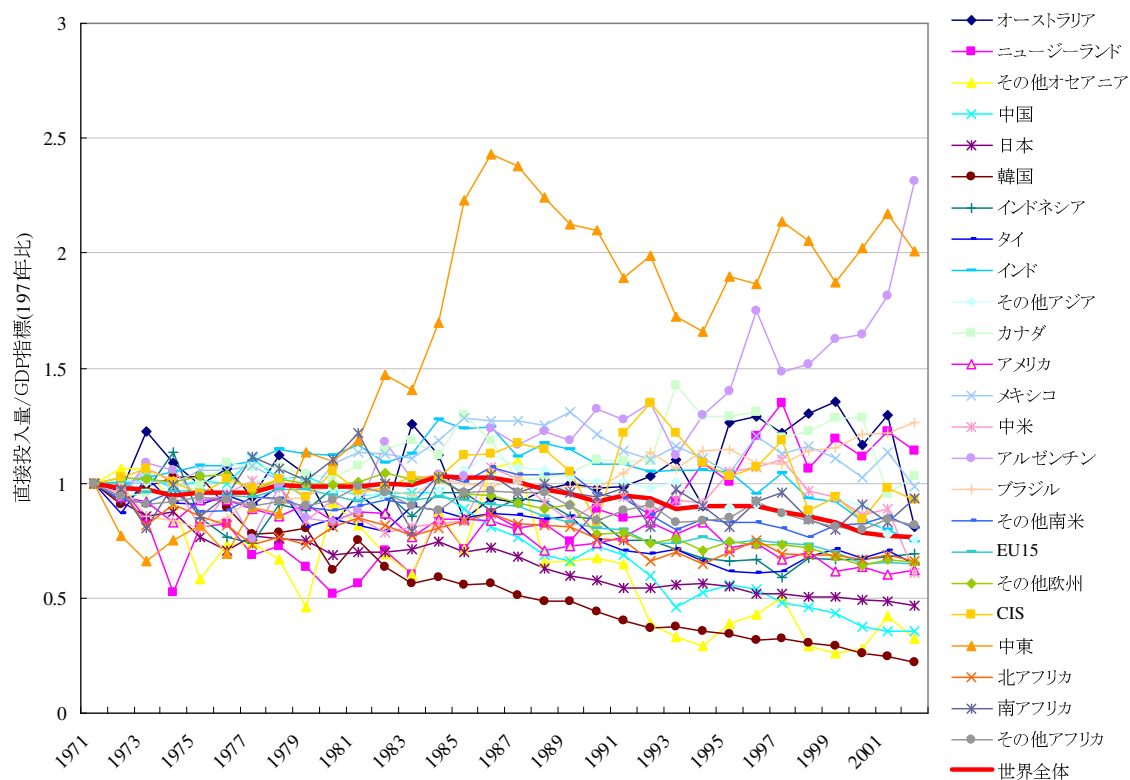


図 9.18 1971 年を 1 とした地域別の GDP あたりの窒素直接物質投入量の推移

次に、この Intensity を第一次産業付加価値あたりの直接物質投入量として見てみる。図 9.19 は第一次産業付加価値あたりの直接物質投入量を 1971 年を 1 としたときの指標で表している。世界全体で見たときにはこの 30 年間でほぼ横ばいであったことがわかる。多くの地域、国で 1.0-2.0 程度の増加が観測されているが、物質投入量の大きな、中国、アメリカ、EU15、CIS はそれぞれ 2000 年で、1.0、0.84、0.97、0.95 となり、ほぼ変化がないかもしくは減少した(ただし、物質投入量上位地域の中でもインドは 1.5 となった)。これは、世界全体で見たときに農業の実質生産量と肥料の投入量がほぼ同程度増加してきたということを示している。

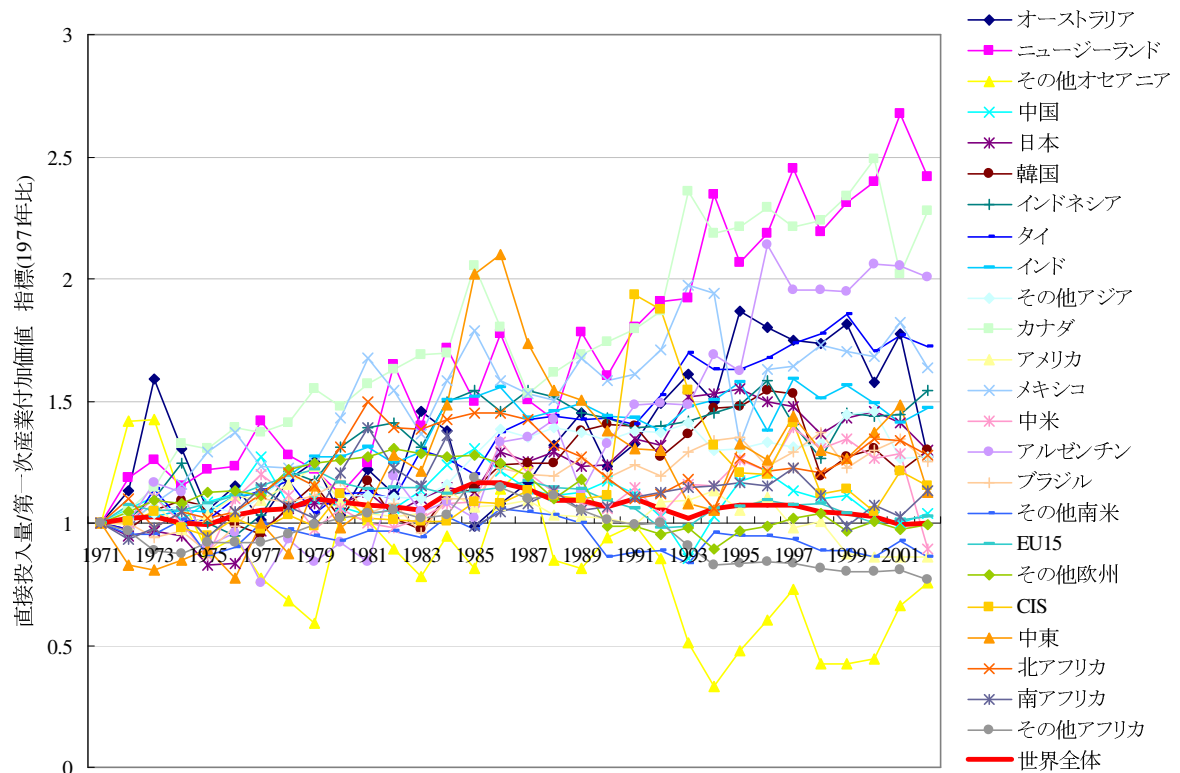


図 9.19 1971 年を 1 とした地域別の第一次産業付加価値あたりの窒素直接物質投入量の推移

#### 9.4.3 過去 30 年間ににおけるリンフロー

##### (1) 環境投入物の投入量

リンの環境投入物の投入量について見てみる。図 9.20 は投入物別の環境投入物の投入量の推移を表している。

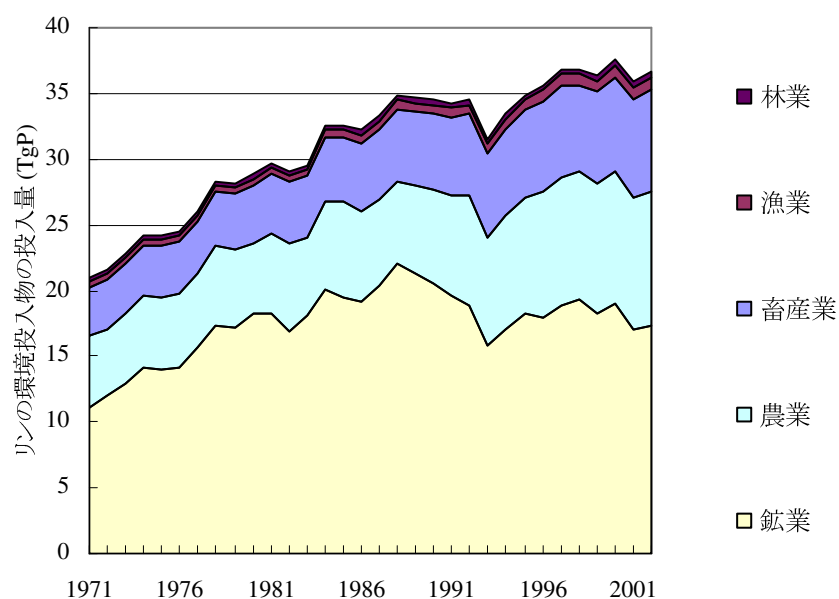


図 9.20 リンの環境投入物の投入量推移(TgP/年)

世界全体で見ると、環境投入物の投入総量は、1971年から2000年の30年間で約1.8倍となった(21.0TgP→37.6TgP)。図からもわかるようにリン鉱石の採取である鉱業の割合が高く、ついで農業、畜産業と続いている。窒素、炭素フローは比較的なだらかな推移をしていたが、リンは1992年付近でやや大きな減少を示すなど、やや年変動が大きい。

次に、内訳を1971年と2000年で比較してみる。図9.21は1971年と2000年における投入量の内訳を表している。

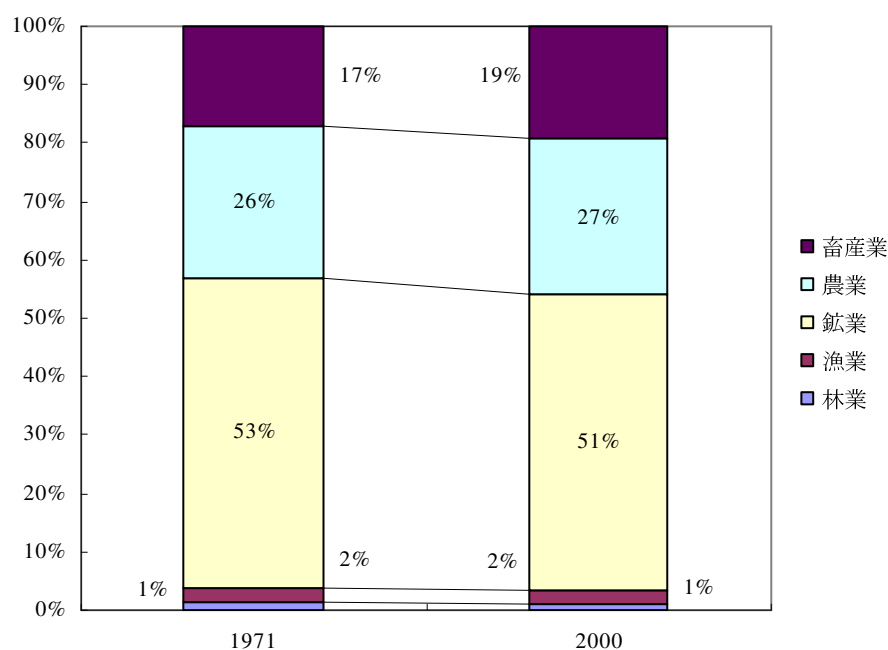


図 9.21 リンの環境投入物の内訳の変化

1971年、2000年を比べるとその内訳の割合はほとんど変化していないことがわかる。鉱業が53%から51%へやや減少したが、その減少分が畜産業、農業における1-2%の増加分となった。

次に地域別で環境投入物の投入量を見てみる。2000年における環境投入物の総投入量の内訳を地域別上位10地域で示したものが、図9.22である。アメリカ、北アフリカ、中国、CIS、インドという順番で大きな割合を占めていた。炭素、窒素のフローと比べたときのリンのフローの特徴を挙げてみる。第一に北アフリカが上位にあることがリンのフローの特徴である。これは、リン鉱石の採掘がモロッコで多いためである。リン投入量の大きな割合を占めているのがリン鉱石であるため、その埋蔵の分布が投入量に影響する。第二に、インドの占める割合が炭素、窒素と比べて小さいことである。



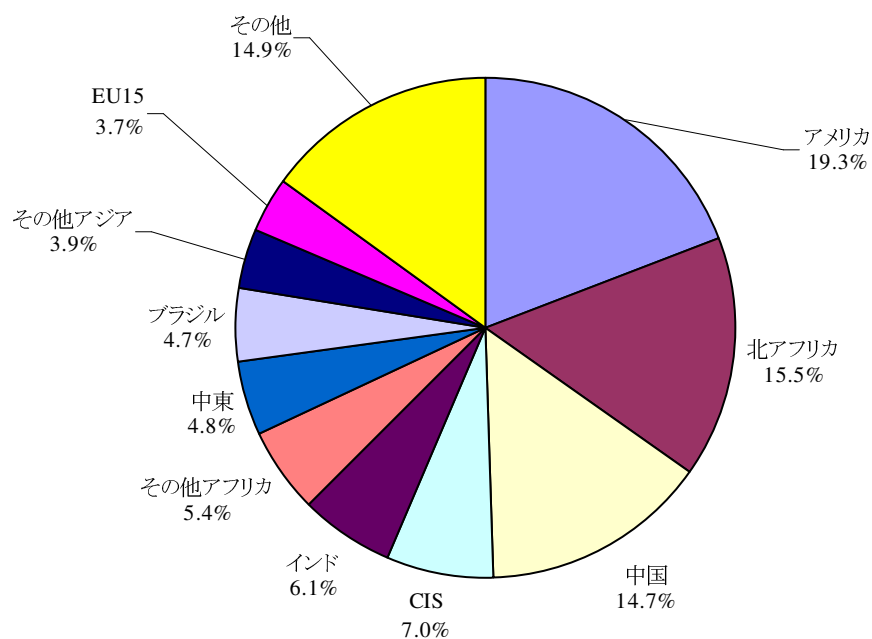


図 9.22 2000 年におけるリンの環境投入物の投入量の上位 10 地域の内訳

次に、各地域の投入の内訳を部門別で見てみる。地域別の投入の内訳を部門別で図 9.23 に示す。

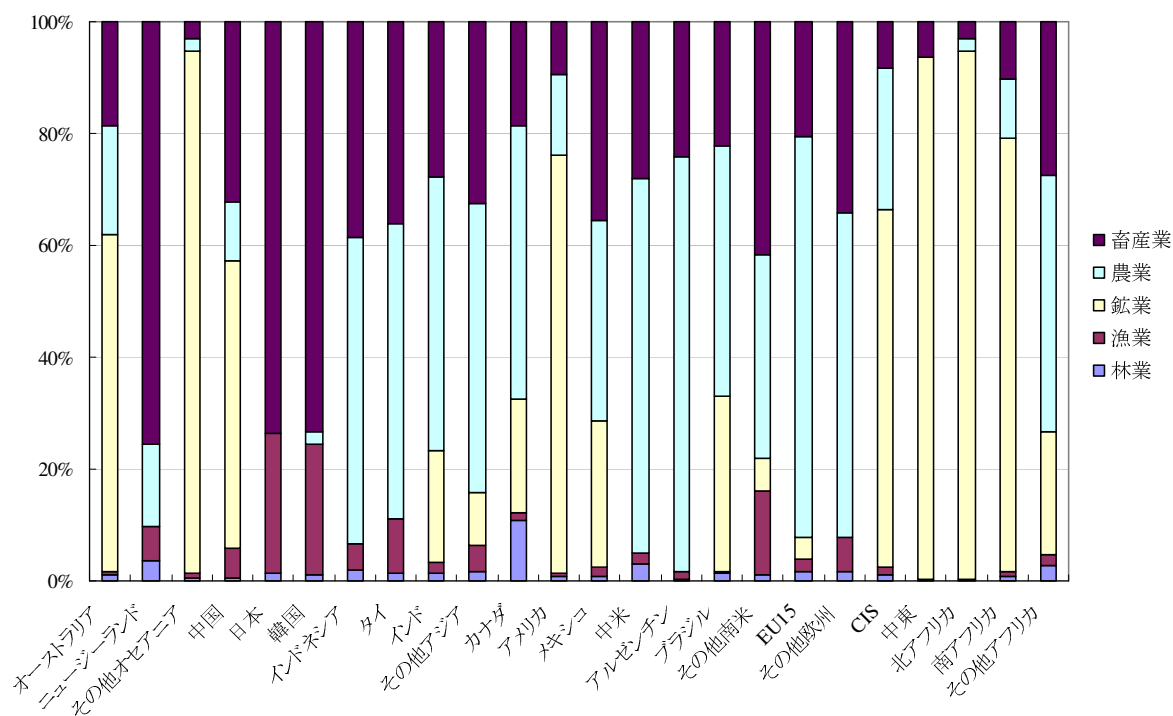


図 9.23 リンの環境投入物の部門別内訳

国により大きく差があり、鉱業(リン鉱石の採掘)が大きな割合を占めている地域と、農

業、畜産業が大きな割合を占めている地域に分けられる。中国、アメリカ、CIS、北アフリカなどの上位国では鉱業が大きな割合を占めている。一方、EU15、インド、ブラジルなどでは農業や畜産業の割合が大きい。日本、韓国は鉱業がなく、畜産業による投入が大部分を占めている。

## (2) 直接物質投入量

次に、各地域の直接物質投入量について見てみる。2000 年における DMC の内訳を地域別上位 10 地域で示したものが図 9.24 である。中国、アメリカ、北アフリカ、EU15、インドという順に大きな割合を占め、上位地域の順位は環境投入物の投入量と異なることがわかる。中国、EU15 の割合が高く、貿易によりこれらの分布が変わったと考えられる。環境投入量だけでなく、直接物質投入量も北アフリカが上位となったことはやはりリンフローの特徴といえる。

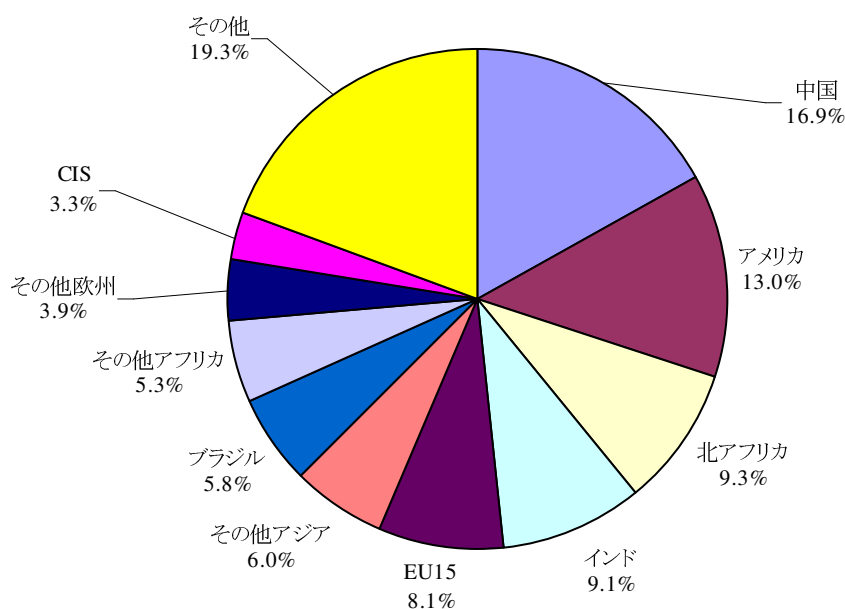


図 9.24 2000 年におけるリンの直接物質投入量の上位 10 地域の内訳

次に、DMC を時系列的に見てみる。1971 年の DMC を 1 としたときの、各地域の変化率を図 9.25 に示す。北アフリカ、中東が大きな増加率を示し、2000 年の値は 1971 年比でそれぞれ 12.6、5.3 倍であった。世界全体の増加が 1.8 倍であったことを考えると北アフリカの増加割合が非常に大きな値であることがわかる。それらの地域に次いだのは、インドネシア、ブラジル、中国であり、3-4 倍の増加となった。直接投入量上位地域であるアメリカ、EU15 は、世界全体よりも増加割合が小さく、それぞれ 1.4、1.1 倍であった。CIS はかなり特徴的な動きをしていて、1990 年ころまで増加していたがそれ以降急激に減少に転じ、2000 年では 1971 年の 0.5 倍となった。

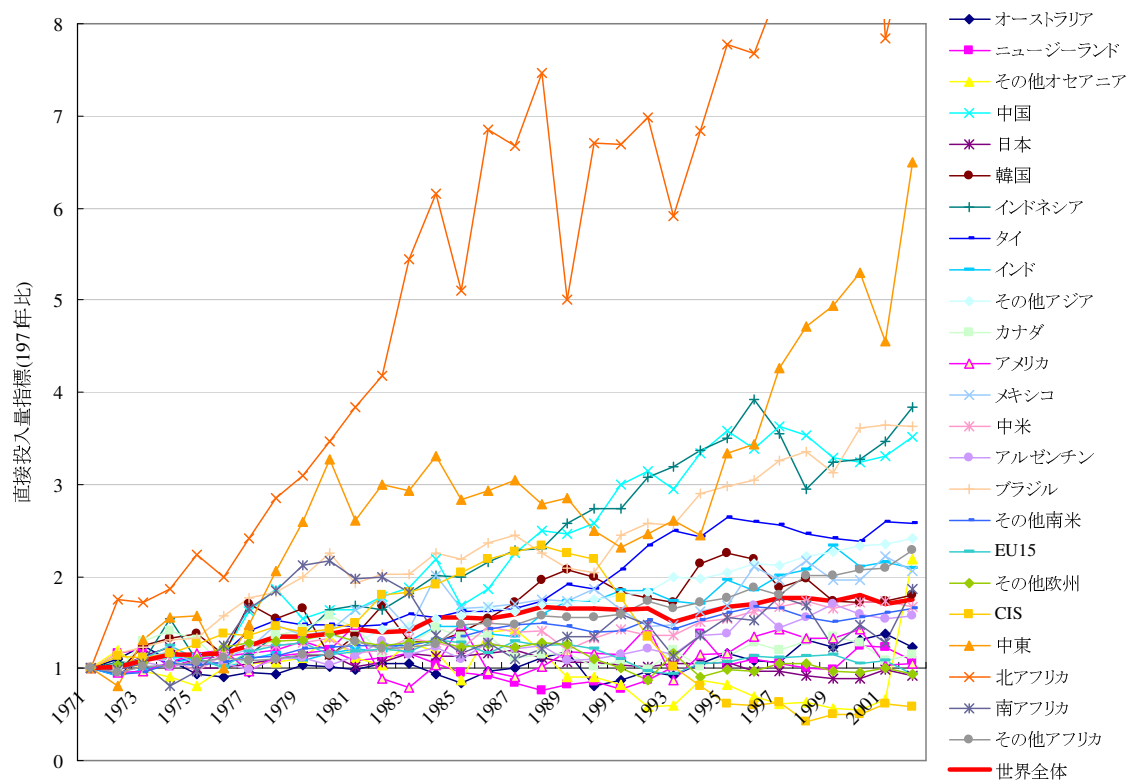


図 9.25 1971 年を 1 とした地域別のリンの直接物質投入量の推移

次に、GDP(US\$ppp 価格)あたりの直接物質投入量を見てみる。図 9.26 は、1971 年の GDP あたりの直接物質投入量を 1 としたときの各地域の経年変化を表している。世界全体では、この 30 年間で減少傾向が継続していて、1971 年比で 2000 年は、0.70 となった。

また、ほとんどの地域で減少傾向が見られ、例外となったのは、北アフリカ、中東、CIS、ブラジルであった。北アフリカのリンフローは炭素、窒素フローと異なり、かなり特殊な挙動をしていて、大きな増加を示した。中東は炭素、窒素のフローでも観測されたのと同様に、リンでも GDP の増加以上に物質投入量の増加が見られた。CIS は前述のように 1990 年付近までは増加してきたものの、それ以降旧ソ連の崩壊に伴い急激に減少した。一方、減少幅が大きかった地域は、韓国、その他オセアニア、中国、アメリカ、日本、タイ、その他欧州、EU15 といった地域であった。炭素、窒素フローと同様にこの 30 年間で急速に経済発展したアジア地域の減少割合が大きいことがわかる。また、それだけでなく欧州、アメリカなどでも減少傾向が見られ、一部の特殊な地域を除いて世界全体としてリンフローの直接投入量と GDP の間でデカップリングが見られる。

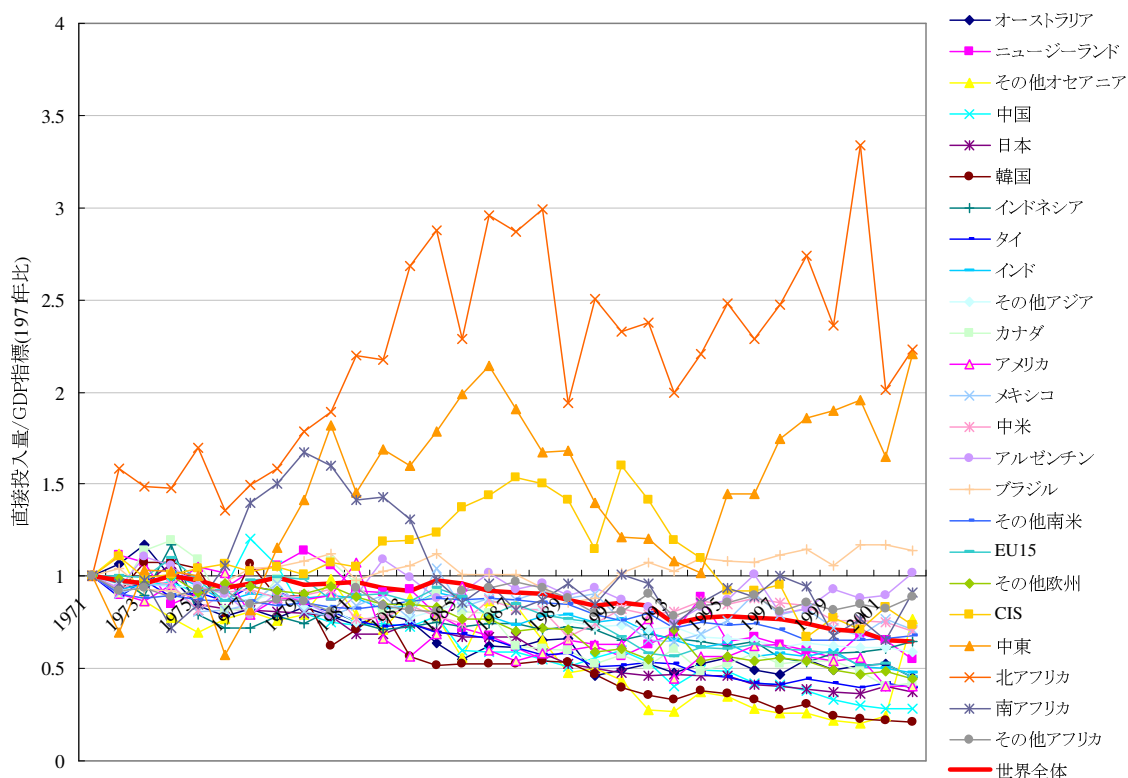


図 9.26 1971 年を 1 とした地域別の GDP あたりのリン直接物質投入量の推移

#### 9.4.4 鉄フロー

##### (1) 環境投入物の投入量

鉄の環境投入物の投入量について見る。鉄は鉱業(鉄鉱石、砂鉄)のみの投入であるため、ここでは地域別の投入量を示す(図 9.27)。世界全体で見ると、環境投入物の投入量は、1971 年から 2000 年の 30 年間で約 1.6 倍となった(338TgFe→539TgFe)。対象期間において一貫して増加してきたわけではなく、減少している期間も存在した(1974 年、1981 年、1989-1992 年)。1974 年、1981 年の減少は石油危機や世界的なインフレによる不況などの要因が考えられ、1989 年以降は旧ソ連の崩壊と共産圏の経済の縮小が主たる要因と考えられる。鉄は主として建築物、輸送機器、機械などの資本となるため、鉄需要は景気の動向に対する感度が高いという面を持つ。次に地域別に比較すると、2000 年ではブラジル、オーストラリア、中国、CIS という順で大きかった。鉄の環境投入物の大部分は鉄鉱石であり、その鉄鉱石が採取可能かどうかということが各地域の投入量の大きさを決めている。

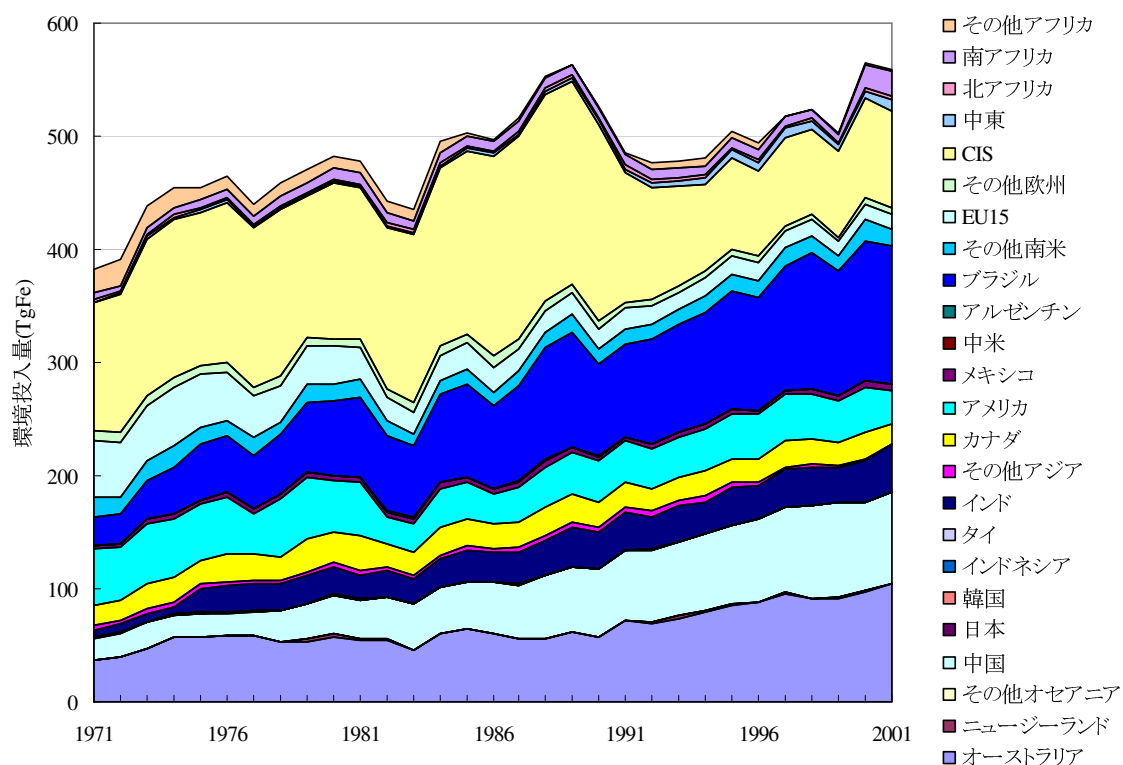


図 9.27 鉄の環境投入物の投入量推移(TgFe/年)

## (2) 鉄鋼の生産量

次に鉄鋼の生産量について見てみる(図 9.28)。また、1971 年と 2000 年における粗鋼生産上位 10 地域をそれぞれ図 9.29、図 9.30 に示す。鉄鋼の生産量は、1971 年から 2000 年の 30 年間で約 1.5 倍となった(565TgFe→825TgFe)。地域別で見ると、1971 年では、EU15、CIS、アメリカ、日本が主要な生産地域であったが、2000 年ではその様子が一変する。まず、中国が一貫して生産量を増加させてきて、2000 年では中国が日本(101TgFe)、アメリカ(98TgFe)、CIS(95TgFe)を抜いて 143TgFe の生産となった。また、EU15、CIS、アメリカはそれぞれ 7-8%程度シェアを減少させている。一方。韓国、インド、ブラジルは 1971 年で 1%かもしくはそれ以下のシェアであったが、2000 年ではそれぞれ 3-5%程度のシェアを占めるようになった。1971 年に対する 2000 年の生産量の増加割合で比較すると、韓国、インドネシアがそれぞれ 85 倍、54 倍と大幅な増加となり、最も増加割合が大きかった。また、3 番目に増加割合が大きかったのはタイ(14 倍)であり、中国も含めてアジア地域の生産量の増加が大きかったことがわかる。

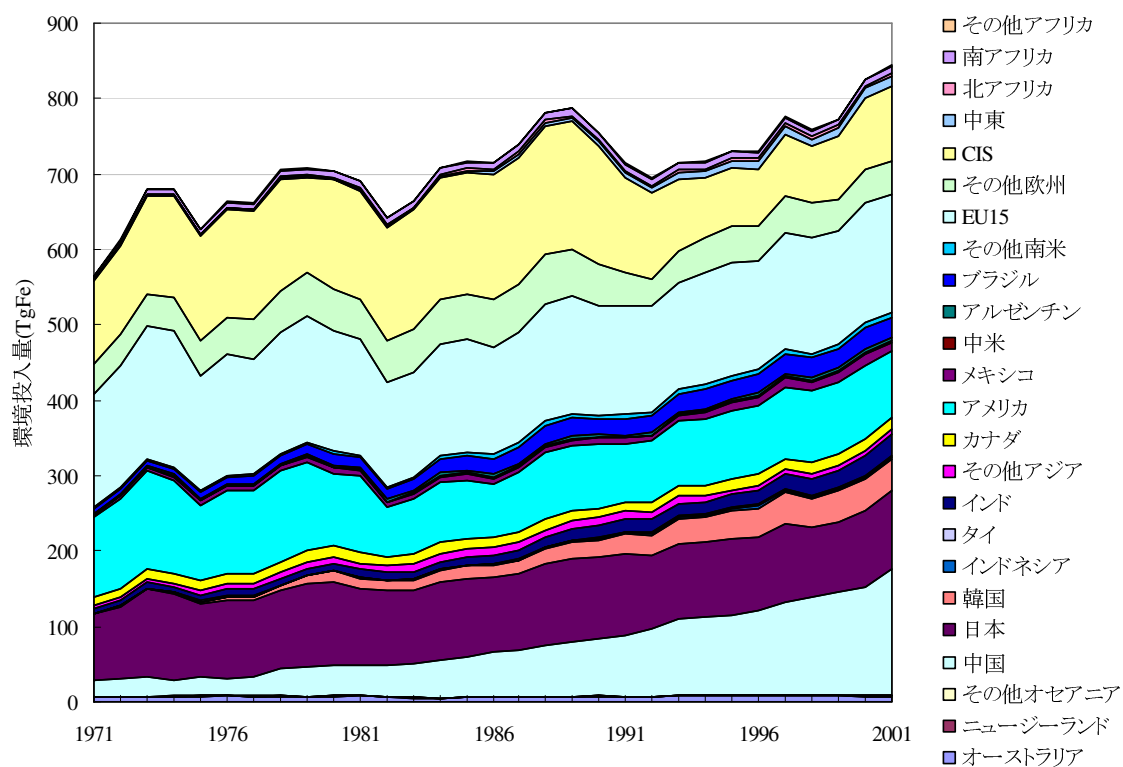


図 9.28 鉄鋼の生産量推移(TgFe/年)

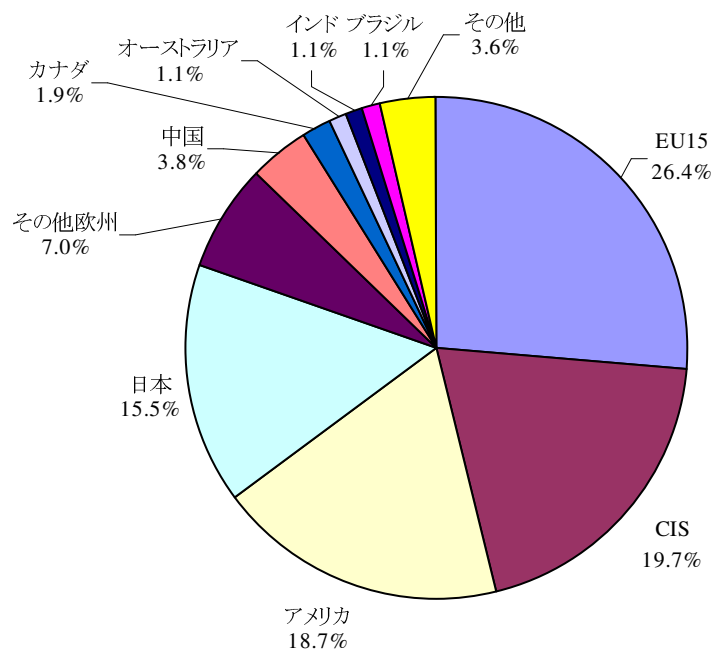


図 9.29 1971 年における鉄鋼生産量上位 10 地域の内訳

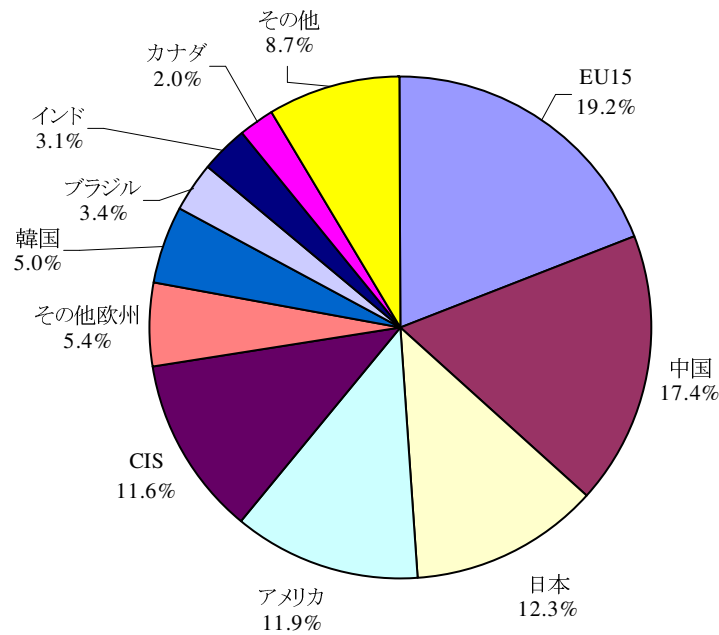


図 9.30 2000 年における鉄鋼生産上位 10 地域の内訳

### (3) 直接物質投入量

次に、各地域の直接物質投入量について見てみる。(ただし、ここでは直接物質投入量にリサイクルされて鉄鋼となる財の量も含むこととした)。1971 年の DMC を 1 としたときの、各地域の変化率を図 9.31 に示す。世界全体では、1.5 倍の増加であったが、韓国、タイ、インドネシア、北アフリカ、中国などで増加率が大きかった。これらの国は鉄鋼の生産量でも増加が目立った地域であったが、直接物質投入量でも大きく増加を示した。日本、アメリカ、EU15 などの先進国ではこの 30 年間でほとんど変化がなかった。一方、減少が目立ったのは、旧ソ連、その他欧州などの旧共産圏を中心とした地域であり、1990 年以降減少している。

次に、GDP(US\$ppp 価格)あたりの直接物質投入量を見てみる。図 9.32 は、1971 年の GDP あたりの直接物質投入量を 1 としたときの各地域の経年変化を表している。世界全体では、この 30 年間で減少傾向が継続していて、1971 年比で 2000 は、0.57 となった。地域別で見ると、ばらつきがあり、増加した地域もあれば、減少した地域もある。増加した地域は、韓国、北アフリカ、タイ、インドネシア、メキシコなどである。アジア地域が多いが、これらの国は 1997-1998 年にかけてアジア通貨危機の影響で大きく減少する。先進国は全体として減少傾向にある。

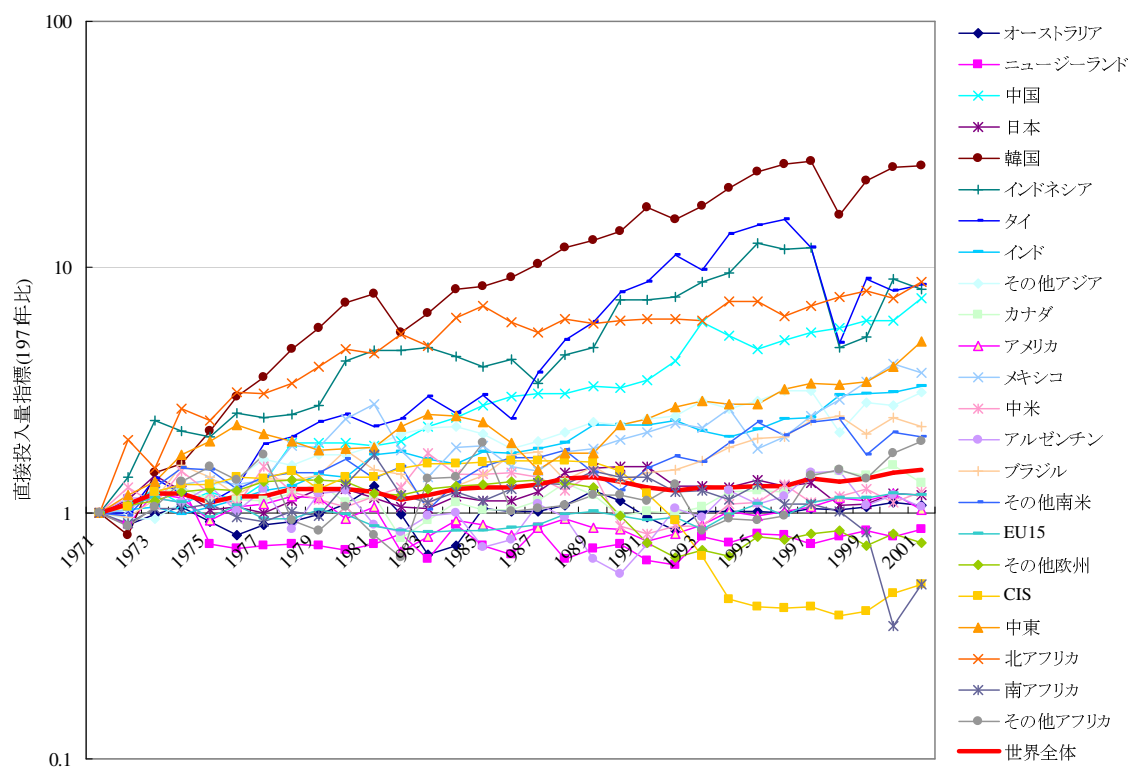


図 9.31 1971 年を 1 とした地域別の鉄の直接物質投入量の推移

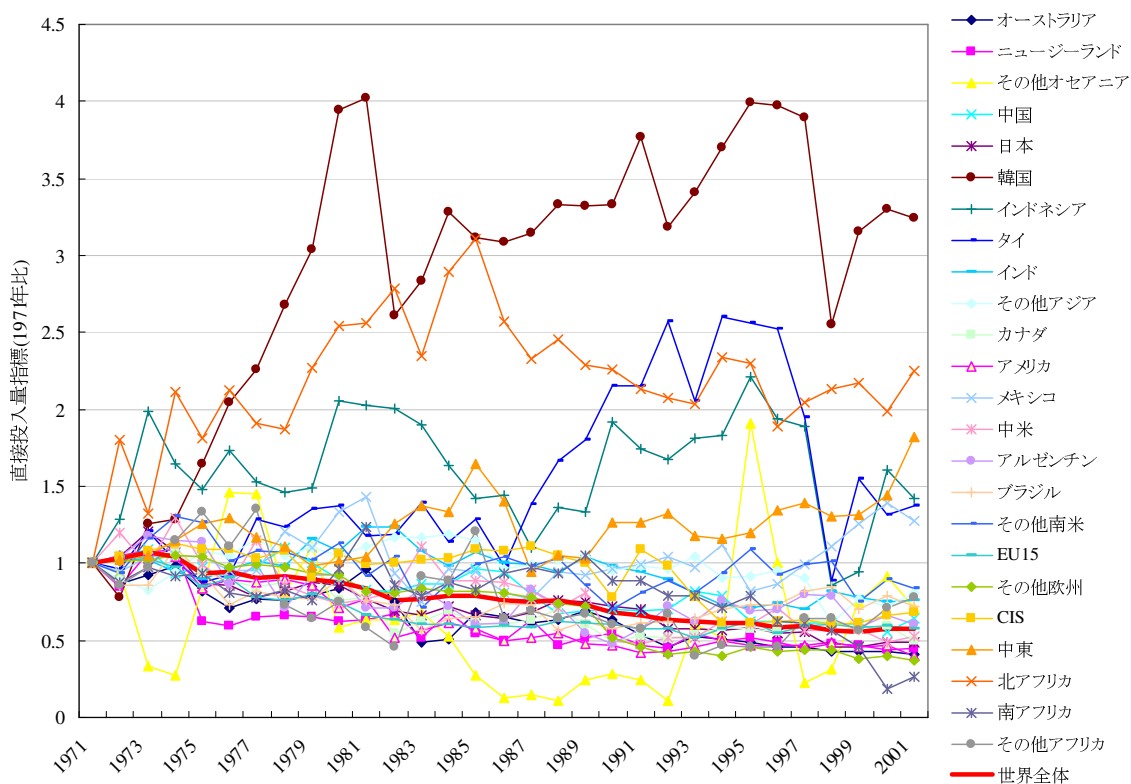


図 9.32 1971 年を 1 とした地域別の GDP あたりの鉄の直接物質投入量の推移



#### 9.4.5 炭素、窒素、リン、鉄、エネルギー量の直接物質投入量の比較

ここまでで得られた、GDP、人口、炭素、窒素、リン、鉄の環境投入量、エネルギー量の推移を比較する。ここでエネルギーとは、化石燃料、再生可能エネルギーなどエネルギー用途の財の投入量を指す。

図 9.33 は世界全体の GDP、人口、炭素、窒素、リン、鉄の環境投入量、エネルギー供給量を 1971 年を 1 として表している。これらのうち最も増加したのは GDP であり 2000 年は 1971 年の 2.5 倍であった。また、人口は同期間で 1.6 倍となった。この間窒素、リンの環境投入量、エネルギー消費量は GDP より増加率が低いものの人口よりは増加率が高く、それぞれ 1.8 倍となった。窒素、リンは農業関連フローが大半であり、人口の増加以上に食の欧米化により肉の需要が増えたこと、化学肥料の投入が増えたことが人口以上の増加を引き起こしていると考えられた。それに対して炭素の環境投入量は 1990 年頃まで人口とほぼ同じような推移となったが、1990 年以降、人口よりもやや緩やかな増加となった。鉄の環境投入量はこれらの中では最も増加率が低かった。1990 年以降の減少が大きく、旧共産圏の衰退が寄与していると考えられる。

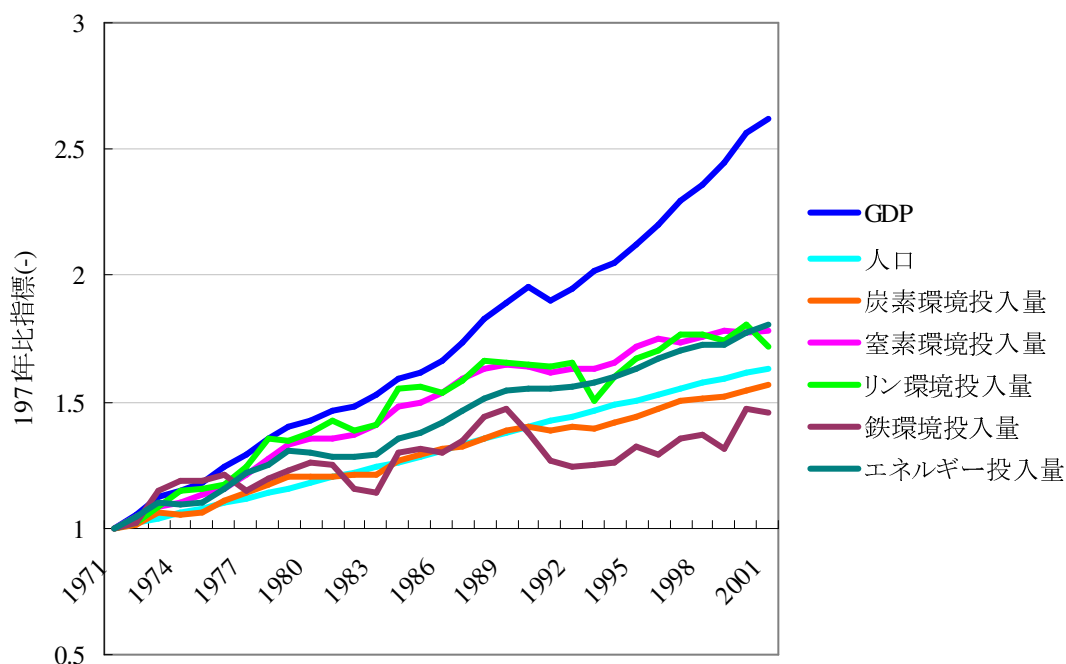


図 9.33 1971 年を 1 とした各種指標の推移(世界全体)

次に、先進国、新興国、途上国という 3 つの地域区分で、GDP、人口、炭素、窒素、リン、鉄の直接投入量、エネルギー消費量を比較する。ここで、先進国はアメリカ、日本、韓国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、メキシコ、EU15、新興国はインド、中国、ブラジル、旧ソ連を集約した。

まず先進国についてみる(図 9.34)。先進国は、物質の投入量は GDP よりも増加が小さいが、人口とはほぼ等しい増加率かもしくはそれ以上の増加を示した。先進国ではこの 30 年間で第三次産業の占める割合が高くなり、物質の投入量は GDP と比べると減少していることがその要因と考えられる。

次に新興国についてみる(図 9.35)。先進国とは大きく異なり、GDP の増加と比べると、いずれの物質も増加は小さかったが、すべての物質で人口の増加を上回る増加が見られた。特に窒素、リンではその増加幅が大きく、新興国では化学肥料の投入が多く行われてきたこと、家畜の増加等がその要因として考えられる。炭素やエネルギーで見ると、1990 年以降増加が小さくなり、鉄は大きく落ち込む結果となった。これは新興国が旧ソ連を含んでおり、旧ソ連の崩壊が大きく寄与していた。ただし、1995 年以降は急激に増加に転じており、新興国の経済成長が鉄需要を牽引したと考えられる。

次に、途上国について見る(図 9.36)。途上国は、先進国と新興国と比べると人口の増加率が大きく、GDP と人口の増加のギャップが小さい、窒素、リン、エネルギーの投入量はほぼ同じような推移をして、GDP と人口の中間あたりの増加となった。1990 年頃までは GDP とほぼ同じような増加をたどっていたが、1990 年代前半でやや GDP の動きから離れ、1995 年以降はまた同じような増加となっている。炭素の投入量は人口と同じような推移であった。鉄の投入量は他の物質や人口、GDP と比べると変動が激しい。1980 年代後半から減少し、1990 年代前半からやや増加してきたが、再び 1990 年代後半に減少し、その後やや増加となった。1980 年代後半から 1990 年代前半にかけての減少は、旧共産圏欧州の経済収縮、ラテンアメリカのハイパーインフレなどによる経済減速が寄与したものと考えられる。

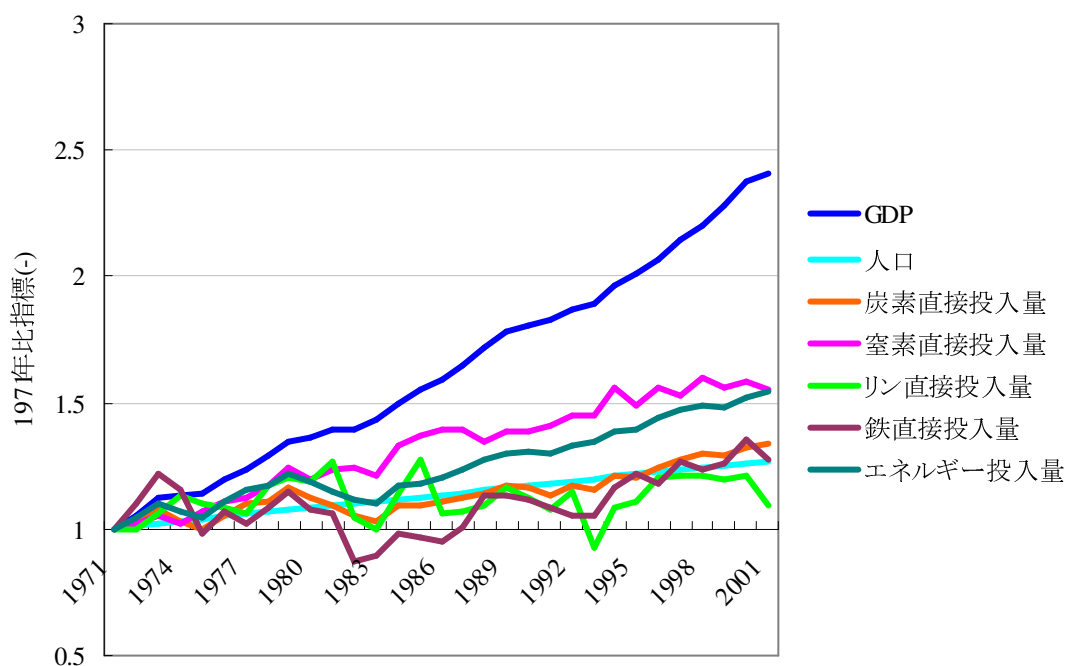


図 9.34 1971 年を 1 とした各種指標の推移(先進国)

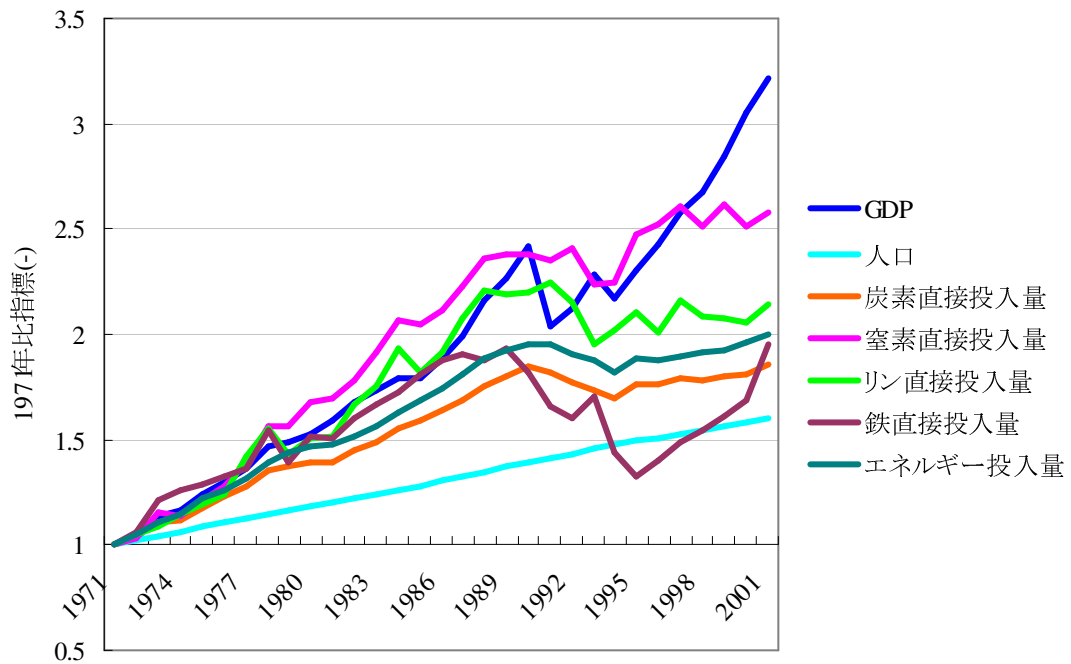


図 9.35 1971 年を 1 とした各種指標の推移(新興国)

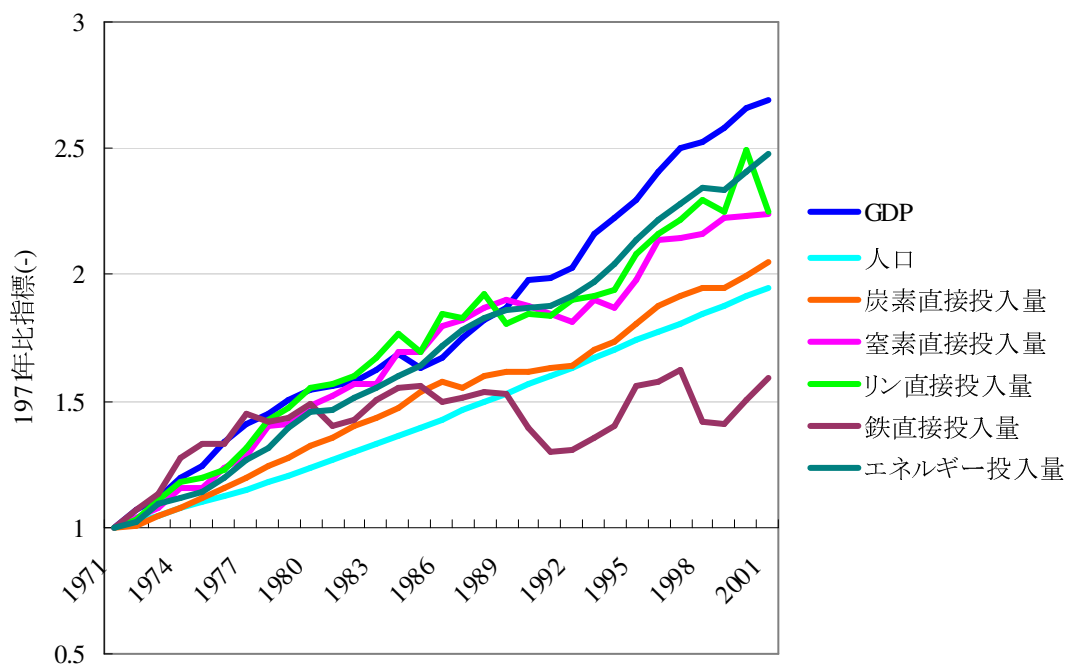


図 9.36 1971 年を 1 とした各種指標の推移(途上国)

以上の結果を地域横断的に比較しとめる。

- GDP に対する物質の投入量は先進国で最も減少している。
- 他の物質と比べると、窒素はいずれの地域でも増加割合が大きい。
- 鉄は GDP の推移と明瞭な関係性がなく、大きく上下する。いずれの地域でも増加割合は小さかった。

- ・ 先進国、途上国では炭素、エネルギーの投入量は人口と同じような増加率であったが、新興国では人口よりも増加率が高い。新興国における炭素とエネルギーの推移に大きな差異がないことから、化石燃料の投入量の増加が炭素の増加を牽引しており、初期の経済発展には、エネルギー財の投入が必要となることが示唆される。
- ・ 途上国は、鉄投入量が人口よりも増加が小さかったが、それ以外ではすべて人口の増加よりも大きく、GDP 増加にかなり近い増加を示していた。

#### 9.4.6 炭素、窒素、リン、鉄の直接物質投入量と経済発展の関係

国横断的に IDMC と一人当たり GDP の関係を見てみる。図 9.37、図 9.38、図 9.39 は、それぞれ横軸に一人当たり GDP(2000 年 US\$ ppp price)をとり、縦軸に炭素、窒素、リンの IDMC をとったものである。図からは、やや例外的な地域も見られるものの、一人当たり GDP の増加とともに IDMC の減少が明瞭に表れている。特にその減少が顕著なのは、一人当たり GDP が 10000US\$以下の地域であり、それ以上となると、IDMC は大きく変化せずなだらかに推移している。リンの IDMC ではその例外的なプロットがやや目立っていて、ニュージーランド、オーストリアというオセアニア OECD 国であった。そのような例外的な点を除くと経済発展と物質の投入量にはある程度関係が見て取ることができる。

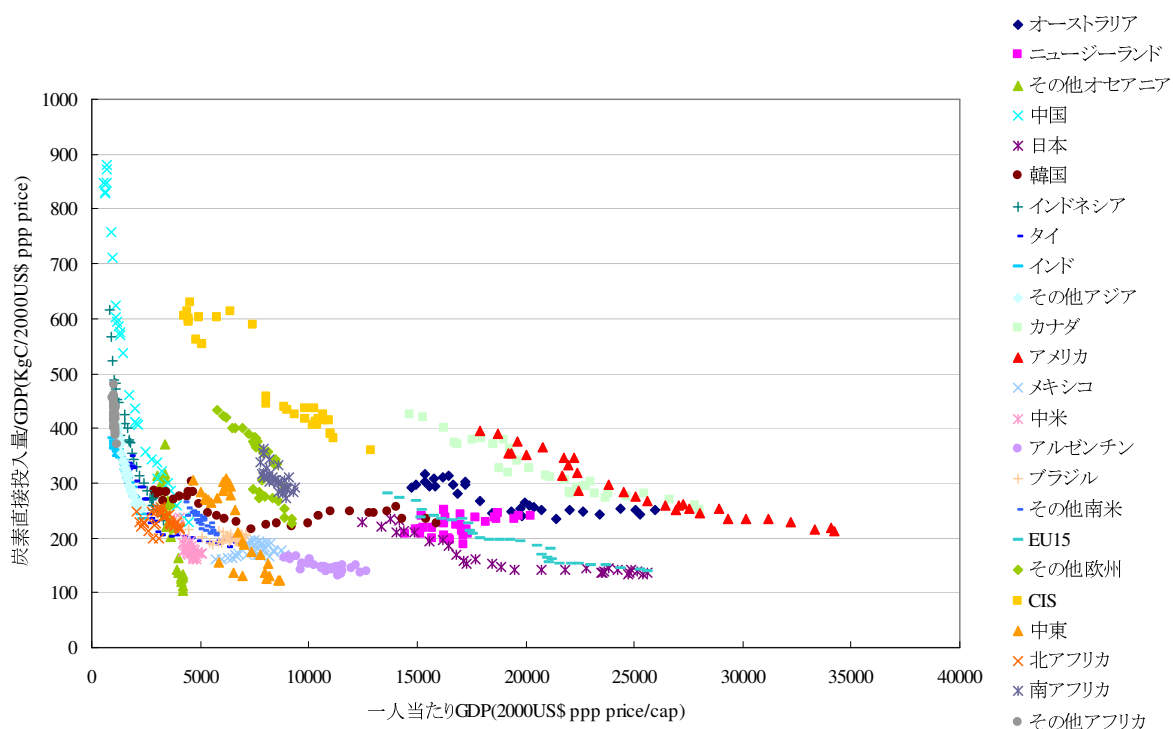


図 9.37 経済発展と炭素の直接投入強度の関係

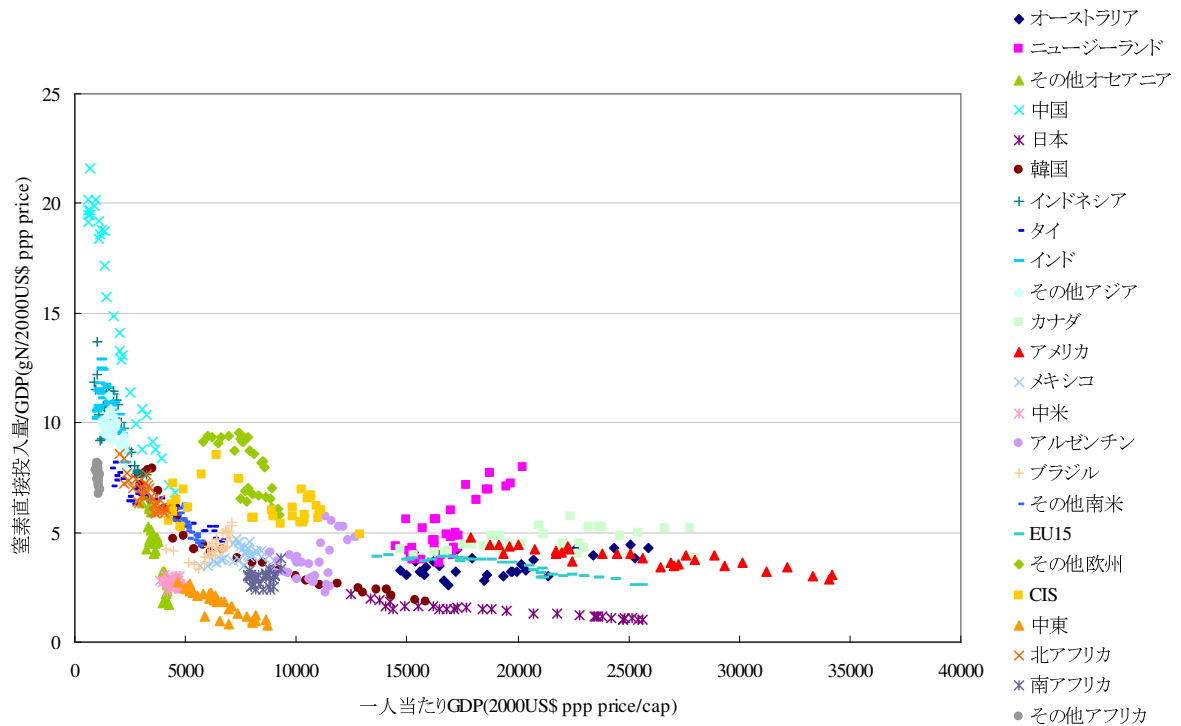


図 9.38 経済発展と窒素の直接投入強度の関係

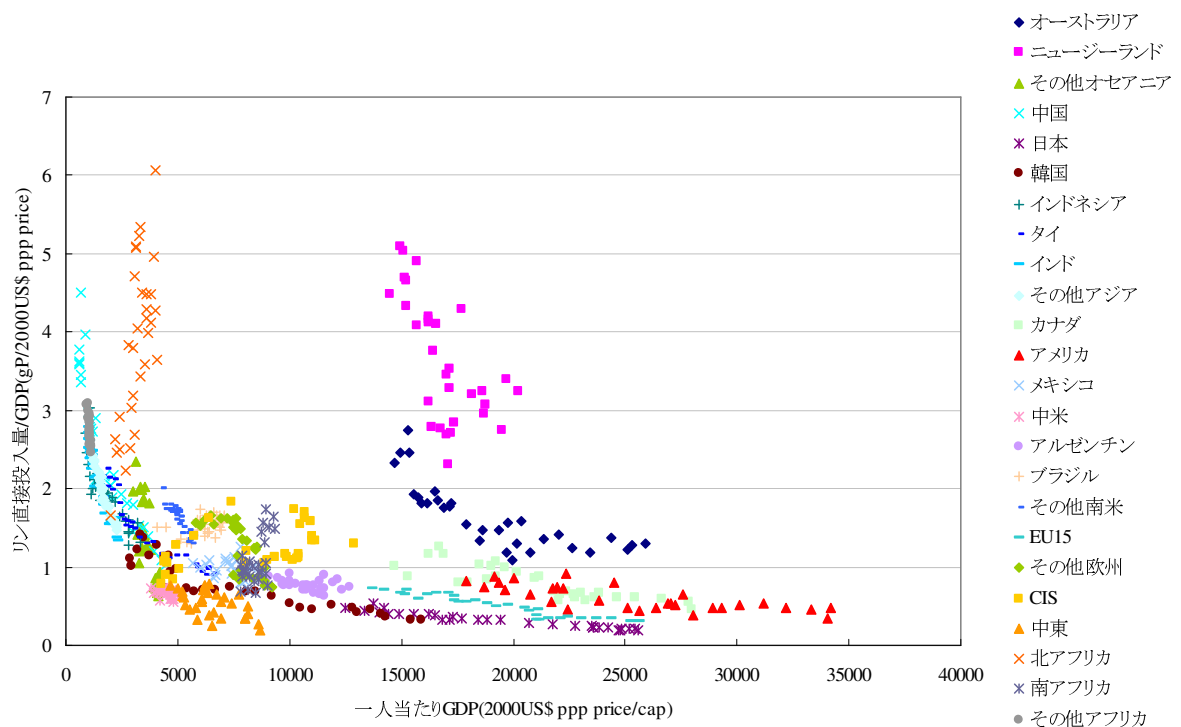


図 9.39 経済発展とリンの直接投入強度の関係

次に、GDP あたりの鉄の DMC と一人当たり GDP の関係を見てみる。図 9.40 は横軸が一人当たり GDP、縦軸が GDP あたりの鉄直接投入量である。この図からは、経済発展と GDP あたりの鉄投入量に 2 つの経路が見られる。一つは、経済発展が初期の段階では急激

に GDP あたりの鉄投入量が増加し(一人当たり GDP で 10000\$程度まで)、それ以降は経済発展とともに GDP あたりの鉄投入量は減少するという経路である。もう一つは、経済発展が初期の段階でもそれほど鉄の投入量が上がらず、そのまま推移するというものである。後者の経路を通っているのは、アルゼンチン、ブラジル、その他南米、中米、メキシコ、南アフリカ、中東であり、資源国もしくは中南米地域が集中している。これらの地域特性が何に起因するものであるか、ということを説明するのはこれらの情報からは困難である。従って、それを明らかにするのは今後の課題としたい。

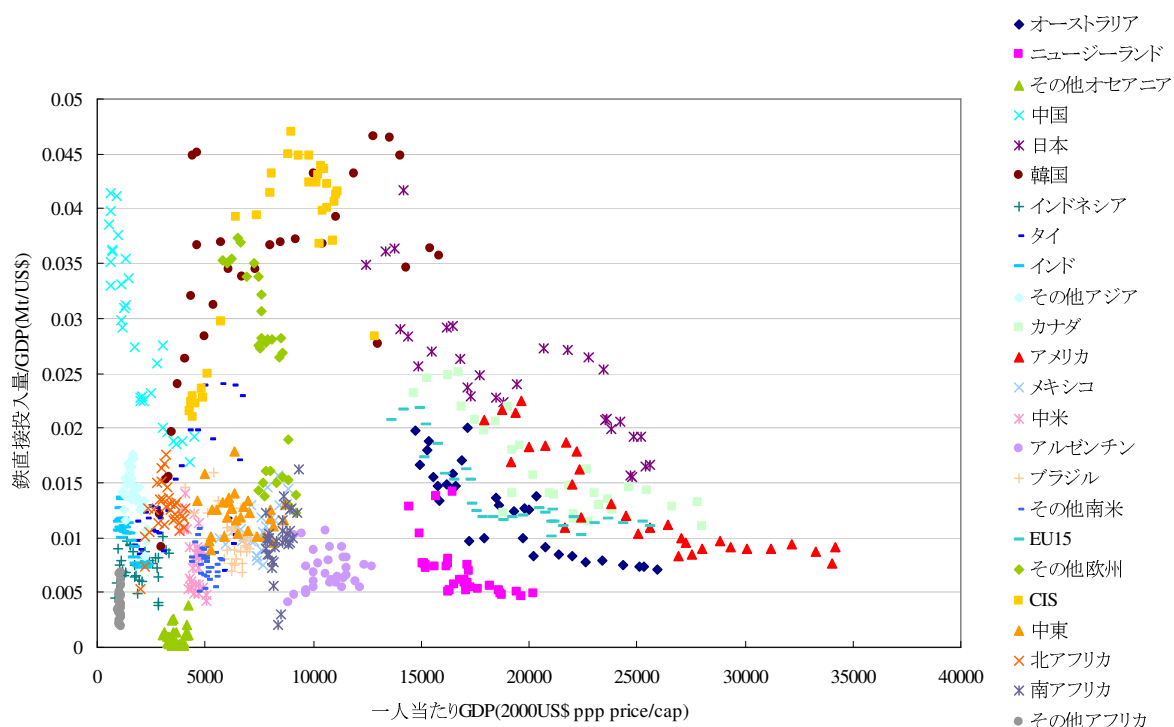


図 9.40 経済発展と鉄の直接投入強度の関係

#### 9.4.7 環境負荷の変遷(農地における窒素溶脱)

本項では、環境負荷の例として農地からの窒素溶脱量を示す。農地からの窒素溶脱量は河川や海洋の富栄養化、水質悪化へ寄与する。図 9.41 は、地域別の農地の面積あたりの窒素溶脱量を表している。対象期間を通じて大きな値を示したのは、韓国、日本、中国といった東アジア地域であった。韓国は 1990 年代後半にかけて上昇してきて、200kgN/ha を越える年も見られたが、それ以降は低下傾向にある。日本は 1980 年以降減少傾向にあり、2000 年では世界全体の平均に近い 48kgN/ha であった。

一方、中国は年によってやや差はあるものの増加傾向のトレンドが見てとれる。欧米地域はアジア地域と比べると、大きな値を示さなかった。次に各地域の農地における投入と産出の内訳を見てみる。図 9.42 は、2000 年における各地域の農地における投入(プラス)と産出(マイナス)を表しており、これらの和が先ほどの農地溶脱となる。前述の上位 3 ヶ国は、作物の生産性も高いが、窒素の投入量も大きいことがわかる。3 ヶ国とも投入割合の大きいのは化学肥料の投入であることがわかる。これら 3 ヶ国と同じような生産性を示

しているのが EU15 であるが、窒素の投入量が小さい分溶脱量も小さかった。

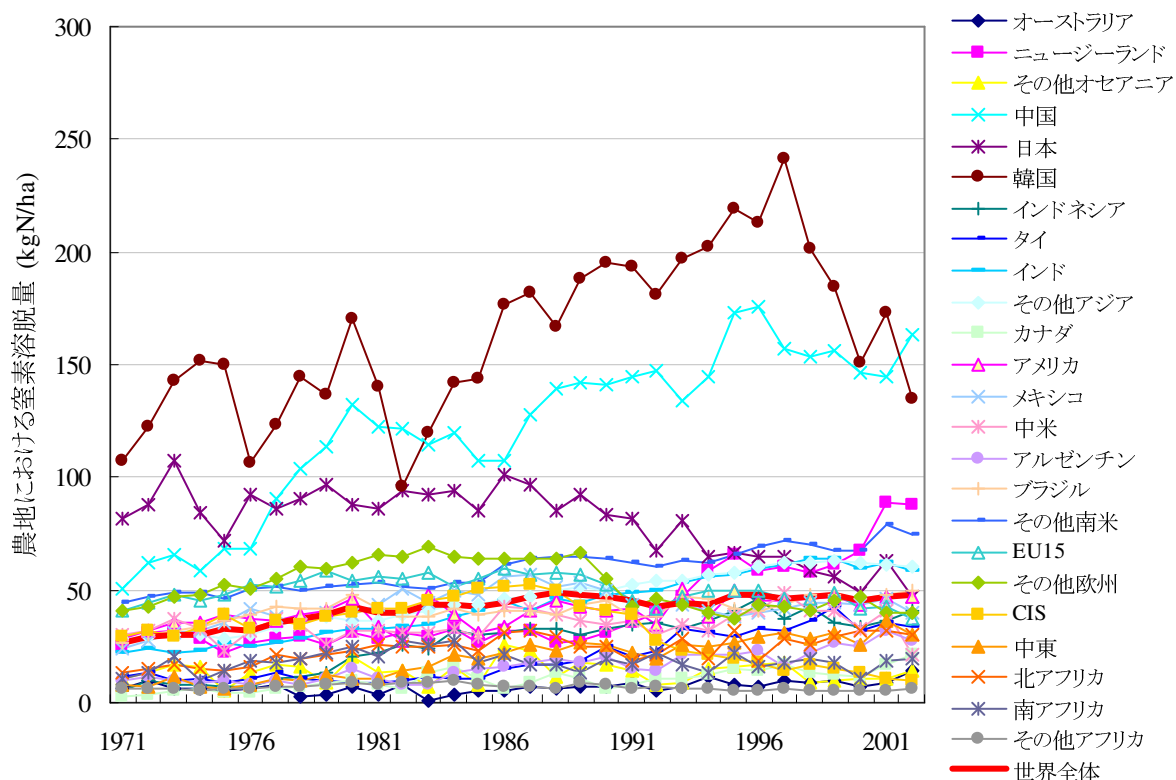


図 9.41 地域別の農地における窒素溶脱量推移

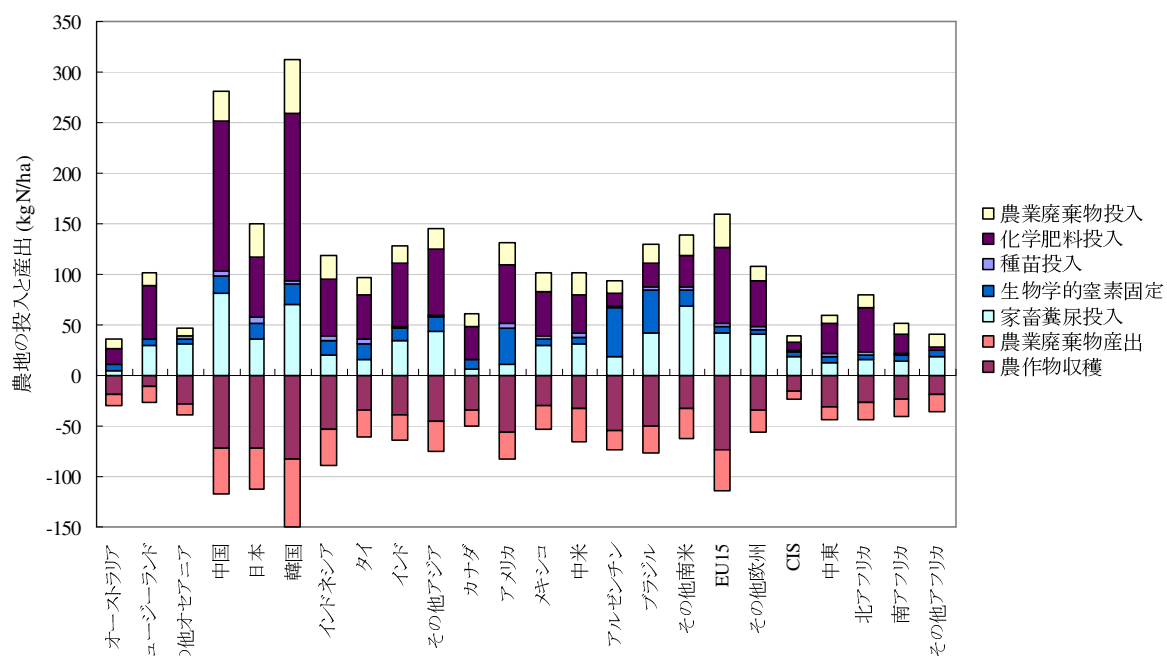


図 9.42 地域別の農地における窒素の投入量と産出量

## 9.5 おわりに

本章では、第 7 章、第 8 章で用いてきた物質収支調整計算には改善の余地があることを示し、その修正を行った。また、それを実際の問題に適用し、より妥当と考えられる解を

得られることを示した。そして、その手法を過去 30 年間(1971 年から 2000 年 9 の炭素、窒素、リン、鉄の物質フローについて適用し、その解析を行った。

主たる結果は以下のとおりである。

- (1) 世界全体では対象期間の 30 年間に於いて、物質フローの投入量は増加してきて、炭素、窒素、リン、鉄はその投入量が 1.5-1.8 倍となった。対象期間の 30 年間に於いて GDP は 2.5 倍、人口は 1.6 倍となったため、人口と物質フローの増加率は同程度であったが、GDP と比べるとその増加率は低かった。
- (2) 先進国、新興国、途上国という区分で見ると、先進国は GDP に対する物質投入量(直接物質投入強度)の減少割合が大きく、新興国、途上国地域ではその減少割合が小さかった。
- (3) 直接物質投入強度と一人当たり GDP の関係に注目すると、炭素、窒素、リンは同じような傾向を示し、一人当たり GDP があがっていくにつれて、直接物質投入強度が減少する。
- (4) 一方、鉄の直接物質投入強度は上記の 3 種の物質とは異なる傾向を示し、以下の二つの経路をたどる地域がある。その一つ目は、経済発展が初期の段階では急激に直接物質投入強度が増加し(一人当たり GDP(2000US\$ppp 価格)で 10000\$程度まで)、それ以降は経済発展とともに減少するという経路である。もう一つは経済発展が初期の段階でもそれほど直接物質投入強度が上がらず、そのまま経済発展とともになだらかに減少するというものである。



## 付録 A

### (1) 物質収支調整計算で用いる文字式一覧

#### ・ 未知変数

##### 物量フロー

$qj_{i,j,r}^{in}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入量

$qj_{i,j,r}^{out}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  の生産量

$qei_{n,j,r}$  : 地域  $r$ 、環境投入物  $n$  の部門  $j$  への投入量

$qwi_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入量

$qj_{i,j,r}^{out}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出量

$qwg_{k,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における廃棄物  $k$  の産出量

$qeo_{l,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における環境排出物  $l$  の産出量

$qq_{p,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における蓄積物  $p$  の蓄積量

$q_{i,r}^{exp}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量

$q_{i,r}^{imp}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量

$q_{i,r}^{stc}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量

##### 物質密度

$d_{i,r}^{out}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産の物質密度

$d_{i,r}^{exp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出の物質密度

$d_{i,r}^{imp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入の物質密度

$d_{i,r}^{dom}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費の物質密度

$d_{i,j,r}^{in}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  の投入の物質密度

$dt_{i,r,s}^{exp}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出の物質密度

$dt_{i,r,s}^{imp}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸入の物質密度

$dw_i$  : 財  $i$  の世界の貿易の平均的な輸出物質密度

##### 観測値との乖離や物質密度の乖離など表す変数

$\varepsilon_{i,r}^{out}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{i,r}^{exp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{i,r}^{imp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{i,r}^{dom}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費量の観測値と推計値の乖離

$\varepsilon_{i,r}^{stc}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量の観測値と推計値の乖離

$e_{i,r}^{exp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  における生産と輸出の物質密度の比

$e_{i,r}^{imp}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  における地域内消費と輸入の物質密度の比

$eddi_{i,j,r}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  における地域内消費の物質密度と各部門  $j$  における投入との比を

$et_{i,r,s}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出の物質密度と世界の貿易の平均的な輸出物質密度  $dw_i$  の比

・ 既知変数

貨幣フロー

$\overline{v_{i,r}^{out}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産額

$\overline{v_{i,r}^{exp}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出額(fob 価格)

$\overline{v_{i,r}^{imp}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入額(cif 価格)

$\overline{v_{i,r}^{dom}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費額

$\overline{v_{i,j,r}^{in}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  の投入額

$\overline{vt_{i,r,s}^{exp}}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸出額

$\overline{vt_{i,r,s}^{imp}}$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  の輸入額

物量フロー観測値

$\overline{s_{i,r}^{out}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の生産量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{exp}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸出量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{imp}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の輸入量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{dom}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内消費量の観測値

$\overline{s_{i,r}^{stc}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の在庫増減量の観測値

設定変数

$\overline{cwg_{i,j,k,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

$\overline{cwg_{k',k,j,r}}$  : 地域  $r$ 、廃棄物  $k'$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される廃棄物  $k$  の発生割合(-)

$\overline{cwgo_{k,j,r}}$  :  $t$  年、地域  $r$ 、部門  $j$  における統計から別途推計する廃棄物  $k$  の産出量

$\overline{ceoi_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

$\overline{ceoo_{i,l,j,r}}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における財  $i$  の産出に伴い産出される排出物  $l$  の産出割合(-)

$\overline{ceos}_{l,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j$  における統計から別途推計する排出物  $l$  の産出量

$\overline{cwgw}_{j,k,j,r}$  : 地域  $r$ 、部門  $j'$  から産出された廃棄物  $k$  の部門  $j$  への投入割合(-)

$\overline{cq}_{i,p,j}$  : 財  $i$  の部門  $j$  への投入に伴い蓄積される蓄積物  $p$  の割合(-)

$\overline{w\epsilon}_{i,r}^f$  : 観測値と推計値の乖離  $\epsilon_{i,r}^f$  に対する重み

$\overline{wj}_{i,j,r}$  : 地域  $r$ 、財  $i$  の地域内投入の部門間の物質密度の誤差の重み

$\overline{we}_{i,r}^f$  : 地域  $r$ 、財  $i$  における地域内の物質密度の比に対する重み

$\overline{wt}_{i,r,s}^f$  : 地域  $r$  から地域  $s$  への財  $i$  における物質密度と世界の平均物質密度との比に対する重み

## (2) 物質収支調整計算で用いる集合一覧

$r \in R$  : 地域の集合

$s \in S$  : 地域の集合

$i \in I$  : 財の集合

$j \in J$  : 部門の集合

$k \in K$  : 廃棄物の集合

$n \in N$  : 環境投入物の集合

$l \in L$  : 環境排出物の集合

$p \in P$  : 蓄積物の集合

$f \in F$  : 生産 "out"、輸出 "exp"、輸入 "imp"、地域内消費 "dom"、在庫増減 "stc" の集合

## 第10章 結論

本研究の成果についてまとめる。本論文では、1971-2000 年の全世界における人間活動由来の炭素、窒素、リン、鉄の物質フローを明らかにした。本研究で得られた成果は第 9 章に示されており、主たる結果は以下のとおりである。

- (1) 世界全体では対象期間の 30 年間に於いて、物質フローの投入量は増加してきて、炭素、窒素、リン、鉄はその投入量が 1.5-1.8 倍となった。対象期間の 30 年間に於いて GDP は 2.5 倍、人口は 1.6 倍となったため、人口と物質フローの増加率は同程度であったが、GDP と比べるとその増加率は低かった。
- (2) 先進国、新興国、途上国という区分で見ると、先進国は GDP に対する物質投入量(直接物質投入強度)の減少割合が大きく、新興国、途上国地域ではその減少割合が小さかった。
- (3) 直接物質投入強度と一人当たり GDP の関係に注目すると、炭素、窒素、リンは同じような傾向を示し、一人当たり GDP が上がっていくにつれて、直接物質投入強度が減少する。
- (4) 一方、鉄の直接物質投入強度は上記の 3 種の物質とは異なる傾向を示し、以下の 2 つの経路をたどる地域がある。その一つ目は、経済発展が初期の段階では急激に直接物質投入強度が増加し(一人当たり GDP(2000US\$ppp 価格)で 10000\$程度まで)、それ以降は経済発展とともに減少するという経路である。もう一つは経済発展が初期の段階でもそれほど直接物質投入強度が上がらず、そのまま経済発展とともにだらかに減少するというものである。

次に各章の内容についてまとめる。

第 1 章では、人類がこれまで抱えてきた物質フローに関する問題について示し、今後物質フローの制御に向けてモデルシミュレーションが有効なことを示した。しかし、そのためには現状を把握するためのデータすら満足に得られず、それが既存の統計の問題によることを示した。そして、本研究ではそのようなデータの整備、調整をし、過去 30 年間の世界における物質フローを明らかにするという目的を示した。

第 2 章では、物質フローに関する既往の研究、勘定体系に関する研究、データの調整方法に関する既往の研究について示した。物質フローの研究は、物質フローに関する研究として先駆的なものから、ここ最近行われている数カ国対象とした物質フローの国際比較研究などを取り上げた。勘定体系に関する研究は、これまで国際的に取り組まれてきた環境勘定の一般的な体系と、応用研究として PIOT について取り上げた。データの調整方法は、経済統計の調整方法、エネルギー統計の調整方法などの先行研究について取り上げた。いずれの研究においても本研究の目的を達するためには、工夫が必要であることを示した。そして、既存の統計を踏まえた上で、本研究の特徴は 3 つあり、第一に世界全域を対象とした物質フローの解明を行うこと、第二に有用性の高い貨幣勘定、物質勘定の作成を行うこと、第三に汎用性の高いデータの調整手法の確立することであることを示した。

第3章では、本研究の推計作業の全体像と、各個別の推計において用いる典型的な方法を示した。具体的には、(1)得たい情報の決定、(2)データの問題点の同定と推計、調整を行う方針の決定、(3)勘定表の決定、(4)推計手法の決定、(5)推計手法の適用という5つのステップを用いることを示した。

第4章では、実用性と信頼性の高い貨幣の貿易マトリクスデータの作成を行う手法の開発を行った。この手法は、複数の貿易統計、財分類の粗いものと詳細なものの情報を同時に扱い、欠損の補完や調整を体系的に行う方程式体系を記述し、より整合性の高い貿易統計値を線形計画問題として求解するものである。さらに、本手法を1965年から2003年に適用し、既存の貿易データに比べ信頼性の高い世界貿易データベースを構築した。

第5章では、本研究は各種統計値に合致する貨幣勘定表、エネルギーIO表を推計、調整する構築手法を提案し、それを適用し化石燃料由来のエネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量を推計した。推計作業は各地域別の推計作業と世界全体の貿易収支をとる推計作業の2種類に分類でき、それらを交互に繰り返し用いる。両推計作業ともにCross-entropy法を用いて定式化した。本研究の推計値と既存の統計値を比較すると、世界全体のエネルギー消費量、あるいはエネルギー消費量の大きな国の国内エネルギー消費量は近い値を示した。一方、一部の特定の国では既存の統計値と本研究の値は大きく異なる値を示した。既存の統計値からエネルギー消費量が修正された主たる要因は、本研究において複数のエネルギー統計を用いたこと、経済情報によるエネルギーフローの補完・修正を行ったことであった。また、エネルギー財の価格を既存の統計と比較すると世界の平均から異常に離れているような価格が修正された。

第6章では、エネルギー投入産出表の構築を行った。現在、世界全域をカバーしたエネルギー統計は、IEAのEnergy Balanceが最も実用性の高いデータとして知られているが、そのEnergy Balanceの抱える問題を解決する手法を開発し、それを適用した。具体的には、2005年を基準としてCross-entropy法を用いて、基準マトリクスからの乖離の大きな統計値の観測情報としての重みを小さくすることにより、(1)時系列変化が妥当であり、(2)欠測がなく、(3)エネルギー転換効率が物理的上限内に収まるようなデータが作成された。

第7章では、炭素・窒素・リンの物質勘定表の構築を行った。この物質勘定表の作成のために、経済活動内、経済活動と環境とのやりとりのフローを扱う勘定体系を確立した。そして、物質フローと貨幣フローの情報を用いた、物質収支調整計算により財に関連するフローを推計した。また、廃棄物の処理、環境とのやりとりに関するフローを推計した。そして、本手法を2001年に適用した。その結果、世界全域での炭素・窒素・リンフローが明らかとなった。

第8章では、鉄の物質勘定表を構築した。鉄に関連するフローを記述する勘定体系を提示し、第7章で示した物質収支調整計算を用い、2001年にその手法を適用した。その結果、全世界の鉄のフローが明らかとなった。GDPや資本蓄積量と鉄の追加量の関係にはある程度関係性が見出されること、経済発展とともに鉄を含む財の貿易構造が変わっていく可能性があることなどが具体的に示された。

第9章では、第7章、第8章で用いられた推計手法の問題点とその問題の解決法を示した。また、その改善された方法を1971年から2000年の過去30年間に適用した。その主たる結果は冒頭に示したとおりである。

最後に、今後の研究発展の方向性について述べる。

まず、今回作成した物質勘定を用いて貨幣勘定を修正するという作業である。今回作成した物質勘定は貨幣勘定が正しいという前提で作成したが、物質の情報で貨幣の情報を修正すべき点が残っている可能性がある。次に、ストック勘定の構築である。今回作成された基礎データを基にして、簡易的なモデルを用いて過去 100 年程度の物質フローを推定しストックを推計する。これらのデータの整備ののちに、政策分析などを行う一般均衡型の経済モデルを用いた物質フローのモデリングを行う。

## 謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々の御指導、御支援、御協力を頂きました。

特に、松岡譲教授には厚く御礼を申し上げます。研究室に在籍してから現在までの約6年間、まったく無知に等しい私に対して懇切丁寧なご指導をし続けて下さいました。私が非論理的な話をしたり、経験と実証に基づかない独りよがりな、あるいは感情を伴った主張をするようなことがあっても、松岡教授は私を放り出さずに厳しくやさしく見守って下さいました。松岡教授の指導力と忍耐力、人情があつてこそだったのではないかと思います。また、研究面のみならず、社会一般の教養なども松岡教授に教えていただく機会が多々ありました。松岡研に入るまで私は興味が外へ向かない内向的な人間でしたが、松岡教授のおかげで様々なことに興味を持つことができるようになりました。至らぬ学生でご迷惑ばかりをおかけしたと思いますが、本当にありがとうございました。今後は、私のために割いていただいた長い時間とお金という投資に対して、少しでも松岡教授に、あるいは社会へ御返しできるように尽力いたします。今後とも相変わらぬ御指導、御鞭撻のほどよろしくお願いいたします。

博士論文の審査をして頂きました森澤眞輔教授にも御礼申し上げます。森澤教授には、博士論文だけでなく修士論文の審査もして頂きました。また原口奨学金の後輩としてもお世話になりました。学生の中に森澤教授と話す機会は非常に限られたものでしたが、今後またお話できる機会、あるいは仕事をご一緒できる機会があることを楽しみにしております。

現在岡山大学の藤原健史教授には、私の学部時代から博士課程1回生時まで研究室の助教授としてご指導いただきました。直接研究の関わりはありませんでしたが、学会等ではお世話になり、ありがとうございました。

倉田学児准教授には、私の博士課程2回生からの2年間御指導、御協力をいただき、ありがとうございました。特に計算機、ネットワーク等で困った時には倉田先生に助けていただく機会が何度もありました。自分の研究に関連する計算機の管理、あるいは研究室の計算機の管理等で多くのことを教えて頂きました。また、倉田准教授の持つ親しみやすさゆえ、様々なことを気軽に話すことができたことも嬉しく思っております。今後も、またお世話になる機会が多々あるとは思いますが、相変わらぬ御指導のほどよろしくお願いいたします。

河瀬玲奈助教には、私が松岡研に在籍した6年間、研究・人生の先輩として、また教師として多くのところでお世話になりました。気分屋の学生で扱いづらく、ご迷惑ばかりお掛けしていたのではないかと思います。寛容な目で面倒を見ていただきありがとうございました。

前秘書の森茉莉さんには、松岡研での4年間、様々な場面で大変お世話になりました。私の松岡研での研究を縁の下で支えてくれていたと思います。ありがとうございました。

現秘書の谷口千絵さんには、短い期間ではありましたが、事務的な手続き、製本等でお世話になり、ありがとうございました。

研究室で一緒に生活した学生の皆様にも謝辞を述べたいと思います。

増富祐司博士、明石修氏、金森有子博士には公私の面で私のお世話をして頂きありがとうございました。増富博士には研究室在籍時のお忙しい中、一緒に飲み、語り、ゲームに興じていただき、私の研究室での生活にとって重要な一部となっていましたし、研究面でも有意義なコメントを頂きました。また、増富博士が話す思想、人生、研究などのあり方などは私の生き方に大きな影響を与えてくれました。明石氏とは博士課程の2年間、共同で研究するようなことも多かったですし、一緒に遊ぶこともあり、大変お世話になりました。金森博士には、唯一の工学研究科の博士課程の先輩として多くのことを教えていただきました。3氏とは今後も、仕事をともにする機会があるのではないかと考えております。松岡チルドレンの集まる日本の研究チームが、世界で一目置かれるようになればいいなと思っています。今後ともよろしくお願いいたします。

研究室の同期で2、3年間苦楽をともにした乾祐介氏、田中吉隆氏、村上正晃氏、村瀬透氏には改めて感謝します。特に修士時代を楽しく、実り豊かなものにしてくれたのはみんなのおかげでした。その修士時代があってこそその博士課程、博士論文だと思っています。

鄭輝喆氏、西本裕美さん、翁御棋氏、五味馨氏、長谷川知子さんとは博士課程に在籍する同志としてお世話になりました。鄭氏とはあまり交流する機会がありませんでしたが、まれに深夜に話す会話がおもしろかったです。西本さんとは私が松岡研に在籍していた6年間共に松岡研で過ごしました。ご自宅での鍋パーティーやバーの飲みに誘っていただきありがとうございました。また、西本さんのおかげで視野を広げることができた面も多かったのです。翁氏とは、1年間しか一緒に空間で研究ができませんでしたが、博士課程同期として、ともに励ましあってこれて嬉しかったです。五味氏とはあまり多くの交流機会を持てませんでしたが、今年度一緒に懸賞論文を書くことができて楽しかったです。また時に研究や政治経済に関する議論ができたことも私にとっては有意義な体験でした。長谷川さんとも懸賞論文を書いたり、遊ぶ機会があったりとおもしろかったです。皆さん博士取得までもう少し苦勞するかと思いますが、頑張ってください。博士取得後も一緒に仕事をする機会があることを楽しみにしています。

現在の修士の学生の中でも特に修士2回生の代の、合田意氏、友成達也氏、長山友祐氏、政井謙介氏、由良僚章氏、そして梶井洋志氏には大変感謝しています。ともに飲み、食い、旅行に行き、スポーツに燃え、ゲームをし、誕生日を祝い、なんばし、徹夜し、愚痴りあい、語らい、・・・非常に楽しい時間をすごさせてもらいましたし、いろんな場面で私のことを気にかけてくれました。本当にありがとう。特に苦難の連続であった博士3回生時の研究生活に活力を与えてくれたのはみんなだと思っています。梶井氏には研究面でも大変な助力を頂きました。平成20年松岡研卒業の同志としてこれからも交流があればいいな、と思っています。

現在修士1回生、学部生4回生のみんなにはなかなか口うるさい先輩だったのではないかと思います。それでも我慢してくれてありがとう。松岡研ではたくさんのことを勉強できると残りの学生生活を楽しまつつ、研究も頑張ってください。

また松岡研や研究とは直接関係がありませんでしたが、東工大博士課程の森田香菜子さんとはほとんど同期のような感じでお互いに励ましあって3年間やってこれて本当によかったです。博士取得までもう少しだけ頑張ってください。



高校からの付き合いとなった相馬宏至氏には私的な交流だけでなく、研究室の多くの計算機を特別価格で取り計らってもらいました。改めて感謝したいと思います。私の研究は計算機の能力に依存する部分が多く、相馬氏のおかげで研究がだいぶ楽に進められるようになりました。今後もお世話になるとと思いますがどうぞよろしくお願いいたします。

林暁恵さんには、博士課程最後の半年間という特に苦しいときに、私の精神的な支えとなってくれました。ありがとうございました。これからもよろしくお願いいたします。

最後に、小中高等学校の12年間と大学学部4年間に加えて、大学院5年間という時間を勉学の時間に充てることを許してくれた両親に感謝いたします。博士課程に進むことを勧める母親に対して、絶対に企業で働くと学部時代は主張していたにもかかわらず、気づいてみると母親の勧める道を選んでいました。またそれは研究者である父親と同じような道でもありました。家族が私の価値観、知識、物事の捉え方に対して強い影響を与えていることを再認識しました。長い研修期間を経てようやく社会に出ることができそうです。これからはできるだけ親孝行したいと思います。

私が研究の対象として携わることとなった気候変動問題のみならず、他の環境問題、貧困と平等、戦争と平和、食料問題、資源問題、エイズ、新型の感染症など、今後数年から数十年の間に人類社会は幾つかの解決困難な問題に直面するのではないかと思います。私がそれらに対してできることというのは極めて限られたものであると思いますが、でき得る限りのことをしたいと思っています。私が生きていることで、あるいは仕事をすることで、少しでも人々の幸福感を増やすことができることを祈り、本論文を終えたいと思います。

2008 年 12 月 25 日  
藤森真一郎